SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©KORISBO/SHUTTERSTOCK - LIKAR/SHUTTERSTOCK

L'œil miroir de notre santé

p.70

Comment s'équiper à domicile ou en entreprise

Les solutions pour produire son énergie

p.46

La France des souterrains du Moyen Âge

p.82

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 915 - MAI 2023 - LES SOLUTIONS POUR PRODUIRE SON ÉNERGIE

MAI 2023 - N° 915 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 915 - F: 5,30 € - RD

Cap sur le bout du monde !

Embarquez pour une **croisière francophone** en compagnie de nos **conférenciers**, sur les traces des plus grands navigateurs, à bord d'un navire spacieux et élégant.

*Prix incluant une remise de 400€/pers. pour toute réservation avant le 15 mai 2023. CGV disponibles sur notre site.

La carte ci-contre correspond à l'itinéraire de février 2024. Photos : ©AdobeStock ©Holland America

CROISIÈRE

PATAGONIE & TERRE DE FEU

par Voyages d'exception

2 DÉPARTS :

NOVEMBRE 2023 • FÉVRIER 2024

Dès **5 590 €**/pers.*

Réservations et informations

Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code PATSC à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

VOYAGES-EXCEPTION.FR

Avast One

Comment fonctionne l'authentification à deux facteurs ?

Vous vous souvenez du temps où seul un mot de passe était nécessaire pour accéder à tous vos comptes ? Vous pourrez bientôt oublier cette époque, car l'authentification à deux facteurs est mise en place un peu partout pour bloquer les pirates et renforcer la sécurité des comptes en ligne. Découvrez comment fonctionne l'authentification à deux facteurs et à quoi elle sert.

Qu'est-ce que l'authentification à deux facteurs ?

L'authentification à deux facteurs, aussi appelée 2FA ou authentification à double facteur consiste à vous authentifier de deux façons différentes, ce qui offre une couche de sécurité supplémentaire dans le monde actuel où les données personnelles sont une cible très recherchée.

Pourquoi utiliser l'authentification à deux facteurs?

L'authentification à deux facteurs est nécessaire, car il s'agit d'un moyen plus efficace de contrôler l'accès à vos données personnelles que de les protéger à l'aide d'un simple mot de passe. Si quelqu'un pirate un compte protégé par une authentification à deux facteurs, il doit aussi connaître le deuxième facteur qui conditionne l'accès à ce compte, par exemple le code de vérification par SMS ou une empreinte digitale. Imaginez que quelqu'un puisse pirater votre compte Facebook simplement en devinant votre mot de passe.
Sans l'authentification à deux facteurs, le mot de passe est votre seule défense face aux pirates ou aux cybercriminels qui veulent revendre vos données personnelles sur le dark web. Alors pourquoi utiliser l'authentification à deux facteurs ? Même si cela prend un peu plus de temps que d'utiliser un simple mot de passe, il est bien pire de voir ses informations personnelles volées ou se retrouver victime d'un vol d'identité.

Comment fonctionne l'authentification à deux facteurs ?

L'identification à deux facteurs assure la sécurité des comptes en ayant recours à deux méthodes d'authentification non liées. La deuxième méthode d'authentification doit en général être validée par quelque chose que vous avez en votre possession, par exemple votre téléphone, en plus du nom d'utilisateur et du mot de passe.

Les trois facteurs qui peuvent être utilisés pour l'authentification à deux facteurs sont :

1- Une information que vous connaissez
C'est quelque chose que vous connaissez. Cet élément ne peut pas être perdu ni trouvé sous forme physique, mais il peut être copié ; il peut s'agir par exemple d'un mot de passe ou d'un code PIN.

2- Un objet que vous possédez
C'est quelque chose *qui est en votre possession* et qui ne peut pas être facilement copié, comme une carte bancaire, une clé ou un téléphone.

3- Un élément (biométrique) qui vous caractérise
C'est ce que vous êtes et qui ne peut pas être facilement falsifié, comme

L'authentification à deux facteurs vérifie votre identité à l'aide de deux ou trois facteurs : quelque chose que vous savez (un code), quelque chose que vous possédez (une clé) et quelque chose qui vous caractérise (vos empreintes digitales).

votre empreinte digitale ou la forme de votre visage.

L'authentification à deux facteurs requiert deux de ces trois facteurs. L'authentification multifacteur peut les utiliser tous les trois, elle peut aussi par exemple utiliser le GPS pour confirmer que vous êtes bien là où vous prétendez être.

Voici quelques exemples courants d'authentification à deux facteurs :

- Retirer de l'argent à un distributeur automatique : vous *connaissez* votre code confidentiel, vous *êtes en possession* de votre carte bancaire.

- Accédez à un compte en ligne avec un code de vérification par SMS : vous *connaissez* votre nom d'utilisateur et votre mot de passe, vous *êtes en possession* de votre téléphone.

- Faire un voyage à l'étranger : vous *êtes en possession* de votre passeport, vous *êtes* qui vous prétendez être, par la vérification de la reconnaissance faciale, de vos empreintes ou de votre rétine.

Ces exemples montrent en quoi l'authen-tification à deux facteurs est nécessaire pour améliorer votre niveau de sécurité personnelle. Avec l'authentification à deux facteurs, le pirate peut installer un enregistreur de frappe pour copier votre mot de passe, mais il ne peut pas pirater votre compte sans avoir par exemple accès à votre téléphone (sur lequel est envoyé le code de vérification unique).

Les exigences de l'authentification à deux facteurs sont les mêmes quel que soit le contexte. C'est ce qui en fait un système si efficace. Les propriétés de base de l'authentification à deux facteurs ne changent pas et il est difficile d'avoir accès à plus d'un des facteurs en même temps, sauf bien entendu si vous êtes bien qui vous prétendez être.

L'authentification à deux facteurs est-elle sûre ?

Oui, l'authentification à deux facteurs est très sûre. Aucune méthode de connexion n'est totalement infaillible, mais l'authentification à deux facteurs vous protège mieux des fuites de données et des tentatives de piratage.

Pour savoir comment configurer l'authentification à deux facteurs, visiter ***avast.com/2FA***

Téléchargez **Avast One** gratuitement sur votre PC sur **avast.com/01net**

Avast One

Un antivirus gratuit primé et une solution de protection avancée

+ Des outils de nettoyage pour améliorer les performances

+ Un VPN pour plus de confidentialité

LE TOUT 100 % GRATUIT !

Et n'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

Jusqu'où peut-on aller lorsque l'on est bien accompagné ?

Imaginer, construire, réaliser, avancer…
La vie est faite d'inspirations,
d'envies et d'objectifs à atteindre.
Nos conseillers et nos experts
vous accompagnent pour anticiper
et préparer vos projets aujourd'hui
et leur permettre de se concrétiser demain.

Prenez rendez-vous avec un conseiller sur hsbc.fr

HSBC

HSBC Continental Europe – Société anonyme au capital de 1 062 332 775 euros – SIREN 775 670 284 RCS Paris. Siège social : 38 avenue Kléber 75116 Paris. Banque et intermédiaire en assurance immatriculé auprès de l'ORIAS (Organisme pour le Registre des Intermédiaires en Assurance – orias.fr) sous le n° 07 005 894. Crédit photo : Getty Images.

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

BERNARD MARTINEZ

La curiosité n'est pas un vilain défaut

Des canaux sur Mars ? Ce n'est pas à vous, chères lectrices et chers lecteurs de *Sciences et Avenir-La Recherche* férus de toutes les sciences, que l'on apprendra les spéculations de Camille Flammarion — après les observations faites par Giovanni Schiaparelli, à la fin du XIXe siècle, de bandes noires sur la planète Rouge —, avec son *« hypothèse d'une origine intelligente de ces tracés »*. Et si personne n'imagine plus aujourd'hui voir gambader de petits hommes verts sur le sol de notre voisine du Système solaire, la tentation demeure de les découvrir ailleurs.

Merveilles de l'Univers. Ce dont on se rend moins compte, c'est la liberté d'esprit qu'impliquait à l'époque la formulation de pareille hypothèse. Liberté de s'interroger sur la pluralité des mondes, sur la possible existence d'êtres intelligents ailleurs, dans un monde dont on commençait tout juste à percevoir l'immensité. Liberté des amateurs des merveilles de l'Univers qui s'estimaient en droit de poser des questions du genre *« Sommes-nous seuls ? »*, jugées non légitimes (insolubles) par l'astronomie « officielle », axée à l'époque sur la mécanique céleste.

Sciences participatives. Retour de manivelle très tendance, les amateurs de science, ces curieux tous azimuts, sont eux-mêmes devenus objet d'étude. C'est leur importance insoupçonnée pour l'histoire des sciences qu'a soulignée Nathalie Richard (université du Mans, CNRS), lors d'une rencontre à l'initiative de l'association des journalistes scientifiques AJSPI. Sujet tendance ? En effet. Ce n'est pas tout à fait un hasard si de tels travaux sont menés aujourd'hui alors que sont plébiscitées celles que l'on nomme désormais sciences participatives. Une façon nouvelle d'embarquer des citoyennes et citoyens, notamment les plus jeunes, dans le mouvement ininterrompu de la science.

Dictionnaire des amateurismes. Avec cette recherche sur *« l'histoire par en bas »*, selon les termes des scientifiques, on (re)découvre que l'insatiable curiosité d'*Homo sapiens* est allée se nicher un peu partout, et pas seulement en astronomie. Archéologie, géologie, préhistoire, botanique, voire physique, médecine, psychologie… en ont bénéficié. On ne saurait alors trop conseiller de feuilleter (sur Internet) le savoureux « Dictionnaire des amateurismes » qui a émergé du projet nommé AmateurS. On y trouve des trésors.

40 000 diapositives. Ce sont en effet d'immenses collections et des musées qui se sont montés, grâce aux amateurs… Leurs interrogations ont suscité la création de multiples sociétés savantes. Un exemple parmi cent ? Les milliers de plaques de verre, 40 000 diapositives et négatifs photo, une centaine de films 16 mm… désormais réunis à l'université de Rennes, issus de la passion d'explorateurs, voire d'aventuriers, depuis le XIXe siècle. Une mine pour les préhistoriens et anthropologues s'intéressant à la Bretagne et plus largement à l'ouest de la France. Un encouragement pour tous ceux qui se revendiquent aujourd'hui des sciences dites citoyennes. ■

@dominiqueleglu

COURRIER

« IA consciente. Le retour d'un fantasme »
(*Sciences et Avenir – La Recherche*, n° 914, avril 2023)

Courriels à :
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Votre article a retenu toute mon attention. En effet, quoi de plus porteur d'espoir pour l'humanité que la mise au point d'une IA qui, dotée d'une intelligence supérieure à la nôtre, serait capable de nous montrer comment assurer une meilleure gestion du monde ? Quelle singularité pourrait donc la différencier de nous ? La réponse réside dans le fait que nous sommes capables d'analyse (nous voyons les choses sous un angle scientifique ou d'un point de vue philosophique) alors que l'IA serait apte à la synthèse (elle combinerait les deux approches ensemble).

Christian Guérin

S. et A. : Pour rebondir sur vos réflexions, il est en fait très difficile d'imaginer ce que peuvent donner à terme l'intelligence artificielle et son rapport à l'intelligence humaine. D'abord, parce que nous avons déjà du mal à définir ce que nous mettons sous le terme « intelligence ». Ensuite parce que l'intelligence artificielle dont il est le plus souvent question, dans l'actualité, dans les articles de vulgarisation (comme les nôtres), les tribunes et autres prises de position des uns et des autres, est une intelligence statistique, approximativement le *deep learning* (apprentissage profond). Or, il n'est qu'une approche, ultraperformante pour certaines tâches, très limitée pour d'autres. C'est pourquoi tout exercice de prospective en matière d'IA reste pour l'heure très hasardeux. Les choses se produisent rarement selon nos scénarios prospectifs, qui ne sont jamais qu'une manière de nous rassurer face à l'incertitude.

Kepler et Aspect

Je veux vous adresser mes félicitations pour votre numéro spécial de janvier-mars 2023 (n° 212) sur la grande histoire de la physique. C'est quasiment un livre de chevet pour tous ceux qui aiment la science. Par contre, je m'étonne de deux oublis dans l'historique de ceux qui ont cherché à expliquer le monde : Johannes Kepler que je ne retrouve pas et même Alain Aspect qui est pourtant quasiment « la vedette » de ce numéro.

Étienne Grandjacques

S. et A. : Cela a été une gageure de faire tenir tout le monde dans ces six pages, et nous avons dû effectivement réduire à la portion congrue l'espace alloué à un certain nombre de physiciens, et non des moindres. Johannes Kepler est ainsi évoqué en quelques lignes. Quant à notre très cher Alain Aspect, disons qu'il hérite d'un sort tout de même plus enviable, avec cette belle interview post-Nobel.

La grande histoire de la physique
Les indispensables de « Sciences et Avenir », n° 212, janvier-mars 2023

Activité physique et sommeil

Votre article « *Cinq questions pour faire face à la fatigue* » (*S. et A.* n° 913) précise que la pratique d'une activité physique moins de quatre heures avant le coucher serait bénéfique. J'ai toujours lu que se dépenser physiquement juste avant le coucher était à éviter.

Jacques Schayes

S. et A. : En effet, plusieurs études arrivent à la conclusion que la pratique d'une activité physique intense est déconseillée une à deux heures avant le coucher, notamment parce qu'elle perturbe l'endormissement et la qualité du sommeil. Mais la réalité pourrait être plus complexe qu'il n'y paraît ! Les liens entre sommeil et dépense physique dépendraient aussi de notre chronotype. Ainsi, une étude américaine, parue en 2016 dans *Chronobiology International*, concluait que ce sont surtout les couche-tôt qui voient leur sommeil se dégrader lorsqu'ils pratiquent un sport dans les heures qui précèdent leur coucher. Les couche-tard, eux, n'en souffriraient pas du tout. Ces observations expliqueraient aussi pourquoi certains préfèrent faire du sport le matin, car ils se sentent plus en forme (les couche-tôt), et vice-versa. Finalement, le plus important, c'est de s'écouter, et de pratiquer régulièrement !

Précision

Infarctus. Dans l'article sur l'insomnie et les facteurs de risque d'infarctus (*S. et A.* n° 914, page 20), il fallait comprendre que le risque cardiaque est supérieur de 69 % chez les insomniaques, et non qu'il est *« 69 fois supérieur »* comme nous l'avons écrit.

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Révolution électrique et citoyenne

La neutralité carbone en 2050. C'est l'objectif du plan climat français pour répondre à l'accord de Paris (qui vise à limiter le réchauffement à 2 °C, voire 1,5 °C). Il est plus ambitieux que d'aucuns ne le pensent. Le fait que 90 % de la production d'électricité en France est décarbonée peut donner l'illusion que pour notre pays, ce sera facile. Or, ce n'est pas ce chiffre qu'il faut regarder, mais les 63 % d'énergie consommée qui sont encore d'origine fossile. Réduire cette part ne se fera pas sans une transformation profonde des habitudes de chacun. Au domicile ou dans la petite entreprise, le principal levier est l'électrification de la production de chaleur et des transports. C'est pourquoi nous n'hésitons pas à parler de « révolution électrique ». Une révolution dont le citoyen sera acteur, en produisant lui-même son énergie, en la mutualisant avec son voisin, voire à l'échelle d'un territoire. Les lave-linges ne tourneront plus la nuit, quand la demande industrielle d'électricité chute, mais le jour, quand les panneaux solaires seront à leur maximum de production. Les voitures, qui, rappelons-le, sont stationnées 95 % du temps, seront d'excellentes batteries tampon pour amortir les variations de demande sur le réseau. Quant aux sources d'énergie, la France est bien dotée : vent, soleil et 98 % du territoire qui est éligible à la géothermie — dont le potentiel dépasse l'équivalent de la consommation de gaz russe en 2021 ! Notre enquête révèle que la mutation est bien engagée. L'installation des panneaux solaires décolle. Les premières « communautés énergétiques » se créent pour atteindre l'autoconsommation et faire baisser la facture. Bien sûr, la crise énergétique n'y est pas pour rien. Le retour sur investissement se fait plus vite, tout en participant à l'effort national pour conquérir l'indépendance énergétique. Enfin, un courant *low-tech* percole jusqu'aux écoles d'ingénieurs pour développer de nouvelles solutions durables et accessibles. Il est enthousiasmant de voir à quel point un objectif contraignant se traduit en initiatives innovantes. ■ @mathieu_nowak

> « Il est enthousiasmant de voir à quel point un objectif contraignant se traduit en initiatives innovantes »

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, N. DURBECQ, P. KALDY, N. C. GUTTIEREZ, L. HESPEL, E. TISSANDIÉ
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOUIN - directrice numérique déléguée
Jessica RIOS - responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,019 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « Parure 7 cristaux - Sophia Boutique ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00369636. Distribué par MLP.

LA VOITURE DU FUTUR EST DÉJÀ CHEZ SPOTICAR.

Être leader de l'occasion en France*,
c'est rendre disponibles dès aujourd'hui
les véhicules et les services de demain.

C'est vous permettre d'avoir le choix
entre 6 000 modèles électriques et hybrides,
parmi plus de 50 000 occasions
parfaitement révisées.

C'est faire le choix de rouler
dans des véhicules fabriqués hier,
pour penser sereinement à demain.

SPOTICAR

DES OCCASIONS PLEINES D´AVENIR

spoticar.fr

RCS Nanterre 552 144 503.

* Réseau de véhicules d'occasion détenu par les marques du groupe Stellantis, comptabilisant le plus grand nombre de points de vente en France en 2022 selon L'argus (étude réalisée en mai 2022).

POUR LES TRAJETS COURTS, PRIVILÉGIEZ LA MARCHE OU LE VÉLO. #SEDÉPLACERMOINSPOLLUER

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 915 / Mai 2023

DOSSIER P. 46

Les solutions pour produire son énergie

Pour sortir de la dépendance aux énergies fossiles, les pouvoirs publics incitent les particuliers à produire leur propre électricité. Photovoltaïque, éolien, géothermie... Nous vous présentons les solutions technologiques qui accompagnent cette mutation.

P. 30

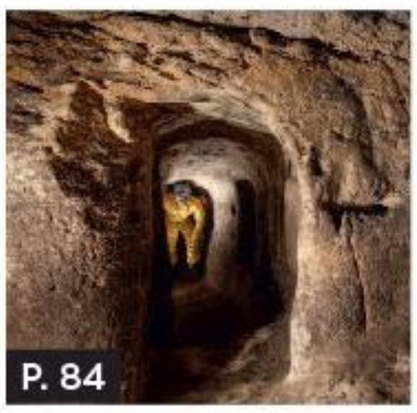
Le nouveau visage de la Voie lactée se dessine

Les résultats du satellite Gaia permettent aux cosmologistes de retrouver les traces fossiles d'événements qui ont façonné l'histoire de notre galaxie depuis sa formation.

P. 70

La rétine, miroir de notre santé

Des dispositifs innovants donnent la possibilité de visualiser dans cette fine membrane des pathologies neurologiques ou le risque de développer une maladie cardio-vasculaire.



P. 84

Dans les souterrains médiévaux de France

Des milliers de cavités dissimulées sous des bâtiments ruraux ont été aménagées par les habitants au Moyen Âge. Reportage en Anjou dans l'un de ces édifices encore méconnus.

7 **Éditorial** par Dominique Leglu

8 **Courrier**

9 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

12 **ACTUALITÉS** La mystérieuse accélération d'Oumuamua enfin élucidée / La tectonique des plaques expliquée

30 **Voie lactée : son nouveau visage se dessine**

36 **La traque sans fin des biais algorithmiques**

39 **Les ballons à la conquête de la stratosphère**

42 **Portrait : Terence Tao, mathématicien**

NATURE

16 **ACTUALITÉS** Ce qu'il faut retenir du dernier rapport du Giec / Le chacal doré s'est installé en France

62 **Évolution : le chromosome masculin en voie de disparition**

68 **Une bactérie géante bouleverse le vivant**

SANTÉ

22 **ACTUALITÉS** La sonogénétique pour rendre la vue / Comment l'hypertension endommage le cerveau

70 **Rétine : le miroir de notre santé**

78 **Le mystère des « jamais covidés »**

82 **Nutrition : les promesses et les risques du régime cétogène**

HISTOIRE

26 **ACTUALITÉS** L'ADN de Beethoven séquencé / Les télescopes de Huygens révèlent sa myopie

84 **Dans les souterrains médiévaux de France**

90 **Ramsès II ou les folles pérégrinations d'une momie**

TRANSVERSALES

98 **Sélection livres**

100 **Expositions**

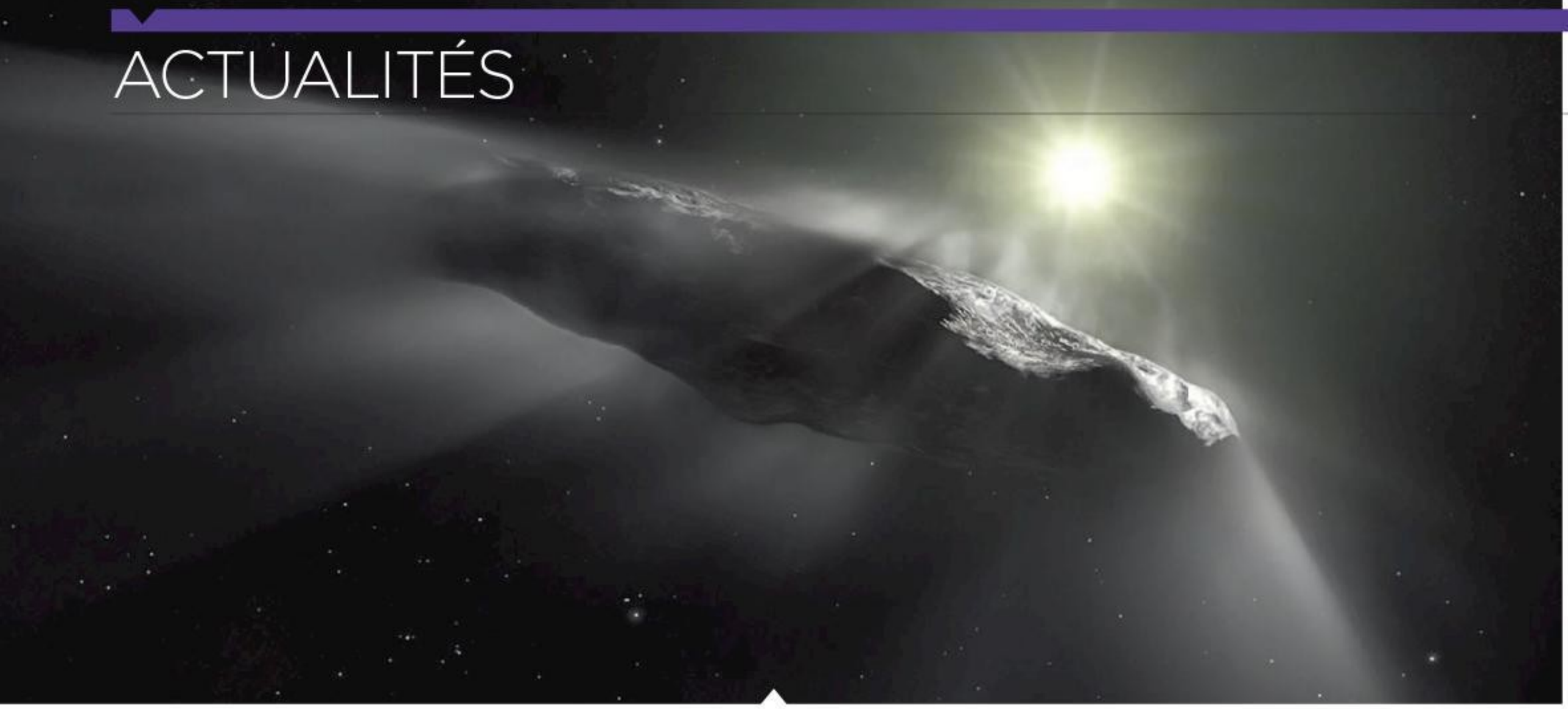
101 **Le ciel de mai**

102 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

104 **Questions de lecteurs**

105 **Jeux**

RICHARD NEWSTEAD/ GETTY IMAGES - ESA/ATG MEDIALAB; BACKGROUND: ESO/S. BRUNIE - GETTY IMAGES - JÉRÔME ET LAURENT TRIOLET/WWW.MONDESOUTERRAIN.FR



En passant à proximité du Soleil en 2017, la glace d'hydrogène de l'objet céleste se serait transformée en gaz (vue d'artiste).

ESA/HUBBLE, NASA, ESO, M. KORNMESSER CRÉDIT

La mystérieuse accélération d'Oumuamua enfin élucidée

Le premier objet interstellaire de l'histoire de l'astronomie serait bel et bien une comète, qui aurait augmenté sa vitesse en expulsant des gaz.

Deux chercheurs américains de l'université Cornell présentent, dans la revue *Nature*, un mécanisme qui pourrait expliquer les caractéristiques étranges d'Oumuamua — premier objet interstellaire de l'histoire de l'astronomie — et résoudre finalement le mystère de sa nature. Lorsque ce corps céleste oblong a été repéré en 2017, sa trajectoire hyperbolique et sa vitesse anormalement élevée indiquaient qu'il venait d'une autre étoile que la nôtre et traversait le Système solaire pour ne jamais y revenir. Mais cette incursion a plongé les astronomes dans une profonde perplexité. Ils s'attendaient à détecter une comète, objet composé de glaces d'eau et de poussières, formé à une distance lointaine de son étoile et donc facilement éjectable dans le milieu interstellaire. Or, les télescopes n'ont détecté aucun halo de poussières caractéristique des comètes. À proximité du Soleil, la vitesse d'Oumuamua a par ailleurs augmenté jusqu'à atteindre 314 000 km/h. Une accélération qui ne pouvait s'expliquer ni par le « coup de pied » gravitationnel donné par notre étoile, ni par un phénomène de dégazage puisqu'aucune émission n'a été observée. Catégorisé comme une comète au moment de sa découverte, Oumuamua a par la suite été considéré comme un astéroïde, un iceberg d'hydrogène, un fragment d'exoplanète… et même un vaisseau extraterrestre ! Moins « exotique » que les précédentes, la nouvelle explication est beaucoup plus convaincante : Oumuamua serait bel et bien une comète qui aurait accéléré en expulsant des gaz à la manière d'une fusée.

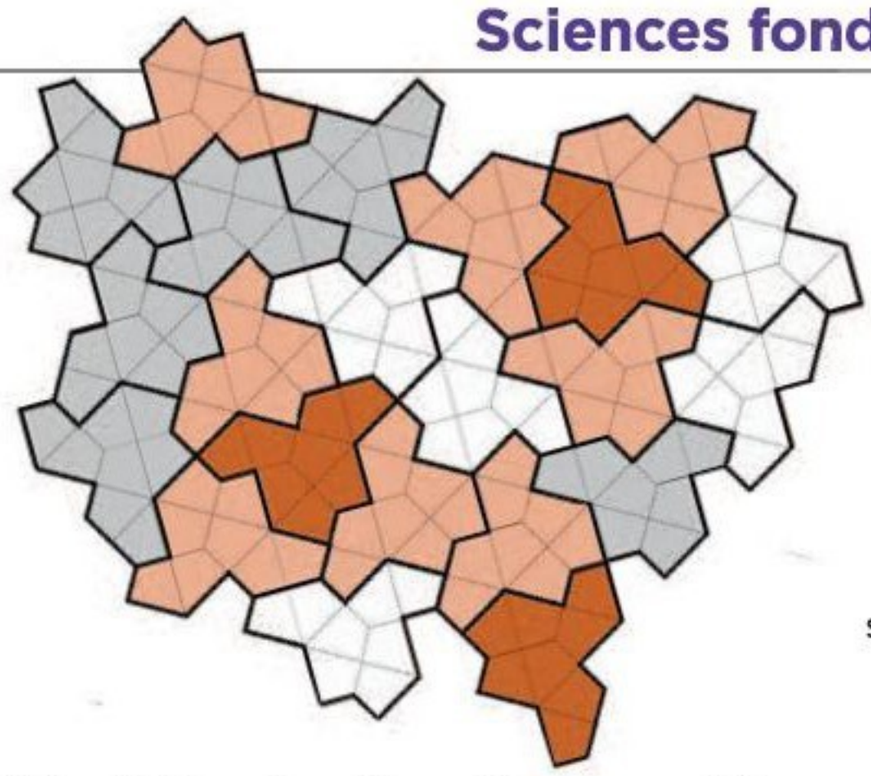
Exposée à des particules très énergétiques

Lors de son voyage dans le milieu interstellaire, elle aurait été exposée à des particules très énergétiques (protons, électrons…) pouvant pénétrer à des dizaines de mètres sous la glace. Plus d'un quart des molécules d'eau se seraient alors dissociées pour produire de l'hydrogène moléculaire. Et cet hydrogène aurait très bien pu rester piégé dans la glace jusqu'à ce qu'Oumuamua atteigne le Système solaire, soutiennent les chercheurs en se référant à une série d'expériences.

À proximité de notre étoile, l'hydrogène se serait transformé en gaz. Résultat : une poussée suffisamment importante pour accélérer Oumuamua aux valeurs mesurées. Si aucun halo n'a été repéré en 2017, c'est parce que seul l'hydrogène se serait sublimé et non de plus grosses molécules. « *Même si de la poussière était présente dans la matrice de glace, celle-ci ne se sublime pas mais se réorganise pour laisser s'échapper uniquement l'hydrogène. La poussière n'est donc pas expulsée* », précise Darryl Seligman, coauteur de l'étude. ■ **F. D.**

Une tuile que l'on n'attendait pas

Le domaine d'étude du pavage apériodique s'enrichit d'une pièce unique en son genre.



D. SMITH, J. MYERS, C. GOODMAN-STRAUSS, C. S. KAPLAN

Ce pavage est constitué d'une seule pièce sans que l'ensemble ne soit répétitif. Un défi mathématique.

Une prépublication a mis le monde mathématique en émoi avec la présentation d'une pièce en deux dimensions — comme une pièce de puzzle — qui couvre entièrement le plan, mais sans aucune répétition. « *La plupart des spécialistes du pavage pensaient qu'une telle pièce n'existait pas* », assure Emmanuel Jeandel, professeur à l'université de Lorraine. Jusqu'ici, des pavages dits apériodiques avaient été trouvés, mais soit il fallait plusieurs morceaux — deux dans les pavages découverts par le Britannique Roger Penrose dans les années 1970 —, soit la pièce en question était de plusieurs tenants. Énoncée par un amateur, David Smith, la découverte de cette monotuile apériodique a été certifiée par le National Museum of Mathematics de New York. « *Elle a une forme simple ! Et les auteurs ont aussi fourni quantité de matériel pédagogique, des vidéos et des modèles pour que l'on puisse soi-même tailler cette tuile* », s'enthousiasme Nathalie Aubrun, chercheuse CNRS à l'université Paris-Saclay. **Ph. P.**

EN DEUX MOTS

VOLCAN La planète Vénus connaîtrait un volcanisme actif, selon l'analyse d'images radar de sa surface prises par la sonde Magellan entre 1990 et 1991, qui montrent un possible épanchement de lave. **MATHS** Le prix Abel 2023 a été décerné à l'Argentino-Américain Luis Caffarelli pour ses contributions au domaine des équations aux dérivées partielles. **NUCLÉAIRE** L'industriel Rolls-Royce a reçu 3,3 millions d'euros de l'Agence spatiale britannique pour développer de petits réacteurs nucléaires pour de futures bases lunaires.

NASA/AP/SIPA

La Nasa dévoile sa nouvelle combinaison lunaire

ESPACE Les astronautes de la mission Artemis III prévue en 2025 seront les premiers à marcher sur la Lune depuis 1972. Ils seront vêtus de la nouvelle combinaison spatiale dévoilée par l'entreprise Axiom Space. Conçue pour résister à l'abrasion des poussières et roches sélènes, ainsi qu'aux écarts de température de -200 °C à plus de 50 °C, elle est dotée d'un casque avec une caméra à haute résolution. **S. R.**

◀ **Le prototype noir** se déclinera en blanc pour la mission.

Un robot imite les vers de terre

BIOROBOTIQUE Une machine reproduisant les mouvements péristaltiques des vers de terre a été conçue par des chercheurs italiens. D'une longueur de 45 cm, elle est constituée de cinq segments qui s'étirent et se contractent les uns à la suite des autres en modifiant la pression de l'air. Grâce à des « écailles » installées sur la partie ventrale, le robot s'agrippe et se déplace sur différentes surfaces à une vitesse maximale de 4,86 m/h. **F. D.**

IIT-STITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA

Les segments reproduisent le déplacement du lombric.

SOURCE : RIDDHI DAS, INSTITUT DE BIOROBOTIQUE DE PONTEDERA, ITALIE.

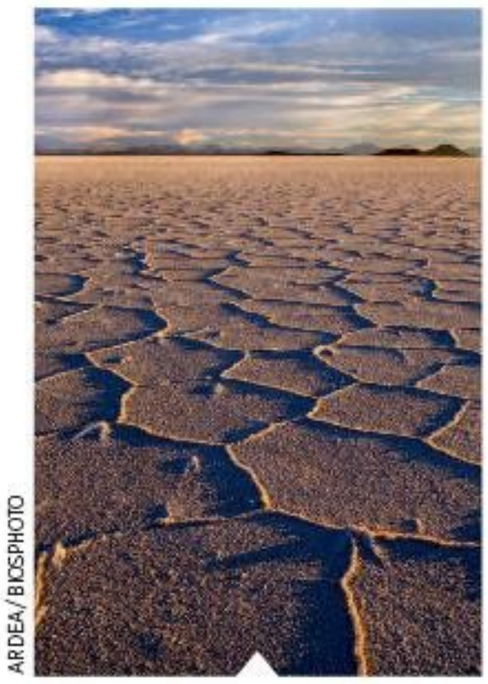
1,9 milliard d'années-lumière La distance d'émission du plus puissant sursaut gamma

ASTRONOMIE Grâce aux données récoltées par le Very Large télescope, au Chili, une équipe a pu localiser l'origine du sursaut gamma GRB 221009A détecté en octobre 2022, surnommé BOAT (« Brightest Of All Time », le plus brillant de tous les temps). Le flash exceptionnel pourrait avoir été émis par une supernova. **H. J.**

L'énigme des polygones de sel résolue

GÉOLOGIE La formation des polygones à la surface des « déserts de sel », sur d'anciens lacs asséchés vient enfin de trouver une explication : ils résultent d'une interaction entre l'évaporation des eaux souterraines, qui fait remonter des minéraux en surface, et les écoulements de fluide chargé en sel. Les formes circulaires qui apparaissent adoptent ainsi progressivement une structure en nid-d'abeilles. **F. D.**

SOURCE : JANA LASSER, UNIVERSITÉ TECHNIQUE DE GRAZ, AUTRICHE.



ARDEA/BIOSPHOTO

Ces motifs géométriques se forment dans les déserts de sel.

NASA/JPL-CALTECH

L'impact de Théia a amorcé la dynamique de la croûte terrestre (vue d'artiste).

La tectonique des plaques expliquée

Elle aurait été enclenchée par la collision avec Théia, une protoplanète de la taille de Mars.

Notre planète est à ce jour la seule connue animée d'une tectonique des plaques, mais on ignore toujours ce qui lui a donné naissance. Un géodynamicien du Caltech de Pasadena (États-Unis) suggère qu'elle aurait été enclenchée par la collision, il y a 4,5 milliards d'années, d'une protoplanète de la taille de Mars, Théia, avec la jeune Terre — rencontre qui a aussi donné naissance à la Lune. Selon son modèle, cet impact géant a engendré une fonte à l'échelle planétaire. Des morceaux denses de Théia auraient sombré au plus profond du manteau, mobilisant alors de grandes remontées de magma en panaches, bloqués en surface par la couche externe rigide. Celle-ci aurait été fracturée et poussée par ces panaches avant qu'ils ne replongent dans le manteau, déclenchant ainsi le début de la subduction, c'est-à-dire de l'enfoncement d'une plaque tectonique sous une autre. ■ **S. R.**

Un robot combine le texte et l'image pour vous servir

ROBOTIQUE Combiner informations visuelles et textuelles dans un agent conversationnel : c'est l'ambition du nouveau projet de Google, PaLM-E. Il permet de piloter un bras équipé d'une caméra en lui posant une question. Le modèle génère une réponse qui sert d'instruction à la machine pour réaliser une tâche : déplacer et trier des objets ou aller chercher un paquet de chips dans un tiroir. **A. D.**

SOURCE : DANNY DRIESS, ROBOTICS AT GOOGLE, ÉTATS-UNIS.

L'exoplanète Trappist-1b n'a pas d'atmosphère

ASTRONOMIE Le télescope spatial James-Webb a pu mesurer la température sur la face de l'exoplanète Trappist-1b toujours tournée vers son étoile. *« Les 500 K [227 °C] enregistrés correspondent aux modélisations d'une planète sans atmosphère. Sinon, des vents transporteraient de la chaleur du côté jour vers le côté nuit et la température serait inférieure de 100 K »*, notent les scientifiques. **F. N.**

SOURCE : PIERRE-OLIVIER LAGAGE, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE

La voûte céleste menacée par les constellations de satellites

ASTRONOMIE Avec l'avènement des méga-constellations — des milliers de satellites envoyés par grappes — lancées depuis 2019, entre autres par l'américain SpaceX, la pollution spatiale engendrée perturbe les observations des télescopes, au point de menacer l'avenir de la profession. C'est l'alerte lancée dans *Nature Astronomy* par des experts qui redoutent que même les images des plus grands télescopes se trouvent polluées par la multitude de traînées lumineuses produites par ces satellites. **H. J.**

SOURCE : JOHN BARENTINE, UNIVERSITÉ DE L'UTAH, ÉTATS-UNIS.

RAFAEL SCHMALL

Traces lumineuses (lignes blanches) laissées par les satellites dans le champ de l'étoile Albiréo.

SNCF VOYAGEURS

POUR LA PLANÈTE, ON EN FERA TOUJOURS MOINS

VOYAGEZ PLUS VITE EN POLLUANT MOINS*

TGV INOUI

DÉCOUVREZ L'ENGAGEMENT ENVIRONNEMENTAL SNCF SUR : SNCF.COM/FR/ENGAGEMENTS/DÉVELOPPEMENT-DURABLE.

*Sur la base des données GES (Gaz à Effet de Serre) SNCF calculées conformément au guide méthodologique de l'information GES des prestations de transport publié par l'Etat français et certifiées par les Commissaires aux Comptes et des données GES du transport de personnes, routier et aérien, publiées en mai 2020 dans la V19.0 de la base de données Base Cabone® (source ADEME : bilans-ges.ademe.fr). Lors d'un voyage à bord d'un train à grande vitesse, sur un trajet longue distance en France, vous émettez 12 fois moins de CO2 qu'en voiture électrique, 26 fois moins qu'en voiture thermique, et 65 fois moins qu'en avion. TGV INOUI est une marque enregistrée de SNCF Voyageurs.

Tous droits de reproduction réservés. SNCF Voyageurs - SA au capital social de 157 789 960 €, inscrite au RCS de Bobigny sous le numéro 519 037 584 – 4, rue André Campra - CS 20012 - 93212 Saint Denis. LH0423 **ROSA PARIS**

ROBIN UTRECHT/ABACAPRESS.COM

Selon les experts, il reste un espoir de limiter le réchauffement à 1,5 °C, à condition d'un sursaut international.

Ce qu'il faut retenir du dernier rapport du Giec

Trois messages principaux émergent du sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Rendu public le 20 mars, le 6e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) compte 10 000 pages de résumé des milliers d'articles scientifiques parus depuis 2014 sur le climat de la Terre, l'adaptation des activités humaines et l'atténuation des gaz à effet de serre.

1. Les événements extrêmes sont liés au réchauffement

Les chercheurs attribuent désormais sans aucun doute la fréquence des tempêtes, la sévérité des sécheresses et la violence des pluies constatées ces cinq dernières années à l'augmentation de la température de la planète du fait des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Ces impacts se font sentir alors que la hausse est de 1,1 °C. Pour ne pas dépasser 1,5 °C, les émissions devraient avoir diminué de 50 % en 2030.

2. La réduction des émissions de CO_2 est possible

Toutes les solutions techniques sont disponibles et peuvent être mises en œuvre pour l'ensemble de la population mondiale. Les énergies solaire et éolienne, l'électrification des systèmes urbains, l'efficacité énergétique, les infrastructures vertes, la réhabilitation des forêts, de zones humides, de terres agricoles commencent à s'imposer. Entre 2010 et 2019, les prix du photovoltaïque ont diminué de 85 %, ceux de l'éolien de 55 % et de 85 % pour les batteries lithium-ion. La puissance installée en solaire a ainsi été multipliée par dix lors de la dernière décennie.

3. Les États doivent accélérer leur action

Les plans d'action des 195 États membres de l'ONU ne permettent qu'une limitation à 2,7°C en 2100. Insuffisant pour les scientifiques qui estiment qu'il faut appliquer dès à présent les changements « transformateurs » de l'économie mondiale : fin des énergies fossiles, transformation du système alimentaire mondial, mise en connexion de la santé humaine, animale et de la protection de l'environnement. ■ **L. C.**

76

Le nombre d'ours recensés dans les Pyrénées

BIODIVERSITÉ La population d'ours bruns détectés dans la chaîne des Pyrénées s'élevait à 76 individus en 2022, selon le rapport annuel de l'Office français de la biodiversité (OFB), dont au moins un est mort au cours de l'année : une femelle qui aurait fait une chute mortelle. 13 oursons sont nés dans huit portées. Par ailleurs, 331 attaques ont été enregistrées, comptabilisant 590 animaux tués, dont quatre vaches adultes. **H. J.**

KATSUHIKO HAYASHI ET AL.

4 des 7 bébés souris nés à partir de cellules mâles.

Sept souriceaux nés de deux pères

REPRODUCTION Une équipe japonaise a fait naître sept souriceaux à partir des patrimoines génétiques de deux pères, une première. Des cellules de peau prélevées sur des mâles ont été reprogrammées en cellules souches pluripotentes (iPS), pouvant se transformer en n'importe quel type cellulaire ; des ovules en l'occurrence, fécondés ensuite par des spermatozoïdes. Portés par des femelles, sept de ces œufs ont formé des souriceaux sur les 630 tentatives des chercheurs. **H. J.**

SOURCE : KENTA MURAKAMI, UNIVERSITÉ DE KYUSHU, JAPON.

Composez votre offre internet et mobile à la carte et faites des économies

orange™

commande
4 personnes

1 Livebox 6 Wifi 6E
2 Décodeurs TV
2 Répéteurs Wifi 6
1 Service Wifi Sérénité
4 Forfaits mobile
1 Accès réseau mobile n°1
- 4 Remises Open

..... **Promo du moment** .....

1 Paramount + inclus 6 mois
sur demande puis 7,99€/mois

Jusqu'à
-15€/mois
de remise Open
sur chaque forfait mobile

menu
Open

L'accès aux répéteurs, décodeurs et service Wifi Sérénité est sur demande.

Offres soumises à conditions, valables en France métropolitaine sous réserve d'éligibilité. Engagement 12 mois pour Livebox. Sans ou avec engagement de 24 mois selon le forfait mobile choisi.

Wifi : avec équipements compatibles. **Paramount+ :** remise de 7,99€ pour toute souscription cumulative à l'offre Livebox jusqu'au 31/05/2023 avec décodeur compatible. Paramount+ nécessite la création et l'activation d'un compte Paramount+ dans les 15 jours suivant la souscription. **Remise Open :** de 3€ à 15€ en fonction du forfait mobile choisi, réservé aux particuliers dans la limite de 4 par offre Livebox internet éligible. Non cumulable. Perte de la remise en cas de : changement d'offre, résiliation, demande de suppression par le client internet. **Réseau mobile :** selon enquête ARCEP 2022. Orange est 1er ou 1er ex æquo sur 476 des 505 critères.

orange™

LE MOT DU MOIS

La plasticose

Une nouvelle maladie chez les oiseaux

ORNITHOLOGIE Une étude menée sur les puffins à pieds pâles de l'île australienne Lord Howe montre que l'ingestion de déchets de plastique provoque chez ces oiseaux marins une nouvelle maladie appelée plasticose. Elle se caractérise par une inflammation chronique de l'estomac et du système digestif. Elle n'épargne pas les oisillons : certains transportent ainsi 10 % de leur poids corporel en plastique au moment de leur envol. **S. R.**

SOURCE : HAYLEY CHARLTON-HOWARD, UNIVERSITÉ DE TASMANIE, AUSTRALIE.

La fontaine de Jouvence du blob

BIOLOGIE En fusionnant avec un individu plus jeune que lui, le blob (*Physarum polycephalum*) âgé est capable de rajeunir. C'est ce que révèle une étude sur cet organisme unicellulaire singulier, ni animal, ni végétal, ni champignon. Alors qu'à 94 semaines, un blob se déplace à 1,6 mm/h, il retrouve sa vitesse moyenne de 2,5 mm/h après avoir fusionné avec un spécimen âgé d'une semaine. Ce qui explique l'attirance irrépressible des blobs pour les individus plus jeunes. **E. T.**

SOURCE : ANGÈLE ROLLAND, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, FRANCE.

Des fourmis chasseuses de virus

ÉCOLOGIE Pour étudier au plus près la diversité virale de l'environnement, une étude internationale propose de faire appel à des fourmis légionnaires pour l'échantillonnage des écosystèmes. Présentes sur tous les continents, ces prédatrices se nourrissent aussi bien d'insectes, de petits mammifères ou de plantes et sont semi-nomades. À partir de 209 fourmis prélevées dans 29 colonies au Gabon, les chercheurs ont mis en évidence 157 genres viraux et 56 familles virales. **E. T.**

SOURCE : MATTHIEU FRITZ, IRD, FRANCE.

CHIEN LEE / NATUREPL./EBPHOTO

Ces semi-nomades présentes sur tous les continents consomment insectes, petits mammifères ou plantes.

K. SUETSUGU / COURTESY OF K. SUETSUGU / AFP

Cette espèce, commune au Japon, n'avait jamais été décrite.

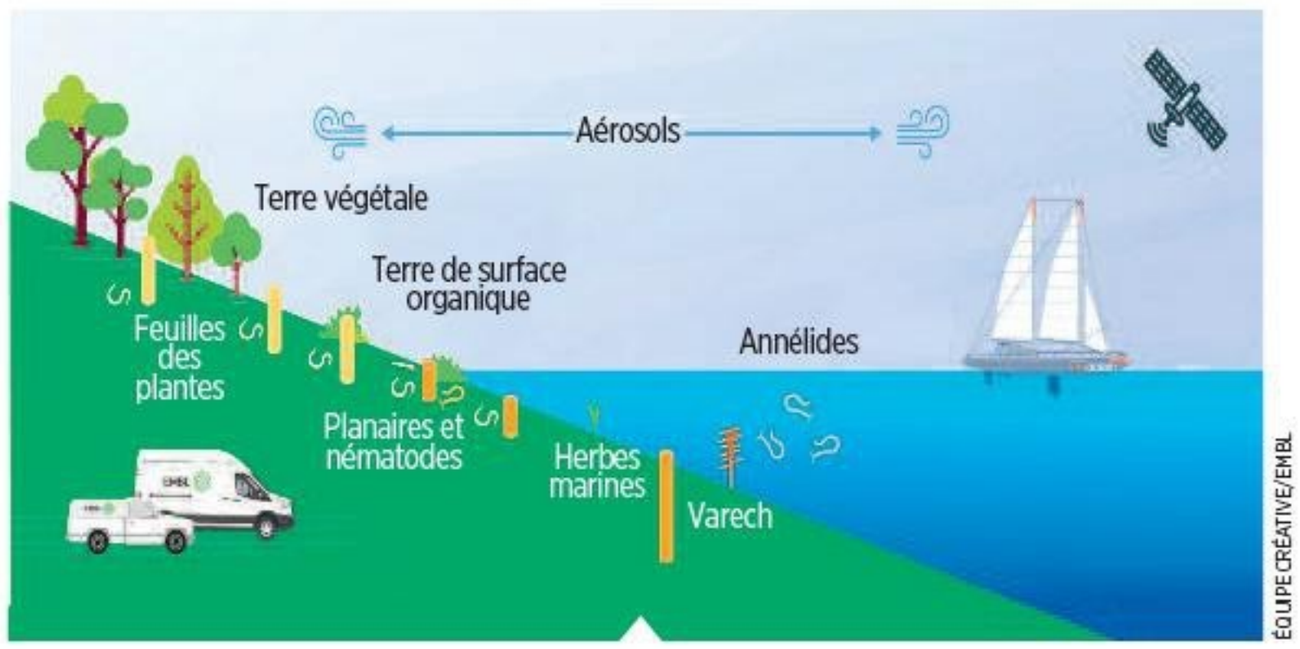
L'orchidée « de verre » enfin reconnue

BOTANIQUE Une nouvelle espèce d'orchidée, dont les fleurs délicates roses et blanches ressemblent à du verre, a été décrite par des scientifiques japonais. Baptisée *Spiranthes hachijoensis*, cette plante vivace s'est révélée commune dans les parcs et jardins du Japon, où elle est parfois appelée « tresses de dames ». **H. J.**

SOURCE : KENJI SUETSUGU, UNIVERSITÉ DE KOBE, JAPON.

Tara va explorer les écosystèmes côtiers

Le navire scientifique va longer le littoral européen pour connaître l'ampleur des pollutions humaines.



ÉQUIPE CRÉATIVE/EMBL

L'expédition explorera les interactions entre les deux écosystèmes majeurs et très divergents de notre planète : la terre et la mer.

La goélette scientifique *Tara* a repris la mer le 2 avril pour une mission de deux ans d'étude des écosystèmes du littoral européen, à l'interface terre-mer. Cette frontière entre deux mondes très différents est aujourd'hui affectée par les activités humaines et leurs pollutions : pesticides, plastiques, antibiotiques et autres produits pharmaceutiques se propagent dans les milieux aquatiques, sans que l'on connaisse leurs effets sur les micro-organismes.

Lancé par le Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), le programme Trec (Traversing European Coastlines) prévoit de prélever des échantillons sur une ligne allant du champ agricole, de la zone portuaire ou du quartier d'habitation jusqu'à 2 kilomètres en mer. La partie terrestre sera assurée par des véhicules équipés de séquenceurs génétiques et de microscopes à haute résolution. L'échantillonnage se composera de prélèvements de sols, d'aérosols, de sédiments, et des premières eaux accessibles depuis la plage. Plus de 120 instituts européens sont impliqués dans cette mission. ■ **S. R.**

PUBLI-REPORTAGE

Panasonic

heating & cooling solutions

LA POMPE À CHALEUR IDÉALE EN RÉNOVATION

Parfaitement adaptée aux rénovations énergétiques, la gamme **Aquarea L** répond aux besoins de maisons disposant de radiateurs existants. Ce, à la fois par son installation simplifiée, sa connexion hydraulique entre intérieur et extérieur, sa température de sortie d'eau élevée et sa résistance aux conditions climatiques. Avec à la clé, toujours plus d'économies d'énergie.

GOOD DESIGN AWARD 2022
BEST 100

La nouvelle génération est arrivée

EN SAVOIR +

Plébiscitée pour son faible impact environnemental et ses hautes performances énergétiques, la pompe à chaleur air-eau s'offre une petite révolution. Chez Panasonic, la nouvelle Aquarea L combine une conception innovante et des fonctionnalités avancées pour un niveau de confort, d'efficacité et de durabilité toujours plus exigeant.

Un système à faible consommation d'énergie

L'Aquarea L, c'est une classe énergétique A+++, le plus haut niveau possible, grâce à un SCOP (Coefficient de Performance Saisonnier) de 5,12. En clair, lorsqu'elle chauffe, la pompe à chaleur consomme 1 kW d'électricité pour produire 5,12 kW de chauffage, en moyenne. Un haut rendement appuyé par un ballon qui conserve mieux la chaleur, réduisant le temps de chauffe quotidien pour consommer toujours moins. Bilan ? L'Aquarea L est économe en énergie, conçue pour durer et même compatible avec une installation photovoltaïque. En phase, aussi, avec le plan Green Impact Panasonic visant la neutralité carbone.

Le confort haute performance

Particulièrement silencieuse avec un niveau sonore réduit à 52 dB(A), l'Aquarea L assure chauffage, rafraîchissement et eau chaude sanitaire, fournissant une température de sortie d'eau jusqu'à 75 °C avec des températures extérieures jusqu'à -10 °C. Avec son expertise de fabricant de PAC depuis 1982, Panasonic a conçu Aquarea L avec un fluide réfrigérant naturel, le R290, et un nouveau compresseur fonctionnant même par -25 °C. Le tout avec une connectivité wifi permettant un contrôle amélioré et la supervision à distance par un professionnel.

L'harmonie dans le design

Plus facile à placer grâce à son niveau sonore réduit, la pompe à chaleur Aquera L innove également par son design harmonieux. L'unité intérieure compacte permet une intégration optimale avec un encombrement minimal dans le logement, comme un appareil ménager, tandis que l'unité extérieure est conçue pour se fondre dans son environnement avec un revêtement gris anthracite et un ventilateur moins visible. Une conception d'ores et déjà récompensée par les Good Design Awards 2022, célébrant les 100 meilleurs designs du moment. ■

Le chacal doré s'est installé en France

Une quinzaine d'observations de « canis aureus » ont eu lieu en métropole depuis 2017.

Le mystérieux animal qui s'est retrouvé sur les clichés pris par un piège photographique en mars 2022 dans la ferme pédagogique de Lanvern, dans le Finistère, n'est ni un loup ni un renard, mais un chacal doré. Il vient d'être authentifié sur cette base visuelle par des experts de l'Institut national de la recherche agronomique (Inrae) et de l'Office français de la biodiversité (OFB), accréditant ainsi l'hypothèse d'une colonisation de l'espèce *Canis aureus* en métropole. Une quinzaine d'observations d'individus isolés ont en effet été réalisées en France (Bouches-du-Rhône, Deux-Sèvres, Essonne…) depuis que l'espèce a été repérée pour la première fois en 2017 en Haute-Savoie. Présent du sud de l'Asie jusque dans la région des Balkans depuis des millénaires, le chacal doré semble accroître sa dispersion vers le nord et l'ouest de l'Europe depuis les années 1960, selon l'OFB. Impossible toutefois de dire combien d'individus peuplent actuellement l'Hexagone ni d'obtenir des preuves de reproduction. **H. J.**

ERELLE LE BERRE ; CLAUDE BALCAEN/BIOSPHOTO

Le canidé accroît sa dispersion en Europe (ici en Bretagne, sur le cliché en noir et blanc d'un piège photographique).

TELAVIV UNIVERSITY

À VOIR SUR LE NET

Les plantes crient quand elles ont soif

BOTANIQUE Ce n'est pas le « cri de la carotte », mais celui de la tomate assoiffée qu'a pu enregistrer une équipe pour la première fois. L'étude confirme que les plantes, lorsqu'elles sont en situation de stress en raison d'un manque d'eau notamment, émettent des ultrasons, inaudibles pour l'humain. Les micros tendus par les chercheurs ont validé ce fait pour le blé, le maïs et même le cactus. **H. J.**

SOURCE : ITZHAK KHAIT, UNIVERSITÉ DE TEL-AVIV, ISRAËL

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Un gène de résistance au sel pour les céréales

GÉNÉTIQUE Le sorgho, une céréale africaine, peut pousser sur des sols de salinité élevée grâce à un variant du gène AT1, montre une étude. Le même variant génétiquement édité chez des plants de riz, de maïs et de millet rend également ces plantes capables de pousser dans des sols salins. Leur sélection permettrait d'étendre les cultures à des centaines de millions d'hectares du globe trop salés pour les cultures ou menacés de le devenir. **P. K.**

SOURCE : HUILI ZHANG, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES, CHINE.

Le poisson le plus profond du monde

ICHTYOLOGIE Record mondial : une espèce de poisson a pu être observée et filmée par 8336 mètres de fond dans la fosse d'Izu-Ogasawara, au sud-est du Japon. Ce sont des poissons-limaces *(Liparidae)* qui ont été immortalisés par les submersibles sans pilote utilisés par les chercheurs de l'université d'Australie-Occidentale. À cette profondeur, la pression est environ 1000 fois supérieure à celle en surface. **H. J.**

PSEUDOLIPARIS

Ce poisson-limace nage par 8336 m de fond au large du Japon.

La transpiration des arbres perturbée par le réchauffement

ÉCOLOGIE L'augmentation du taux d'humidité relative de l'air due au réchauffement climatique entrave la transpiration des arbres, favorisant le jaunissement prématuré des feuilles ou les infestations d'insectes et de champignons. C'est ce que révèle une étude menée sur vingt ans en Suisse, qui a comparé des arbres protégés avec ceux soumis à cette humidité atmosphérique due aux vagues de chaleur. **H. J.**

SOURCE : CHARLOTTE GROSSIORD, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, SUISSE.

PRÊT À PERFORMER, MÊME PAR TEMPS DE PLUIE

TÜV SÜD

MEILLEUR DE SA CATÉGORIE SUR CHAUSSÉE HUMIDE[1]

KILOMÉTRAGE SUPÉRIEUR[2]

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE AMÉLIORÉE[2]

CONÇU POUR VÉHICULES ÉLECTRIQUES :
Pneu conçu pour répondre aux exigences spécifiques des véhicules électriques

TURANZA 6

NOUVEAU

AVEC LA TECHNOLOGIE ENLITEN

[1, 2]

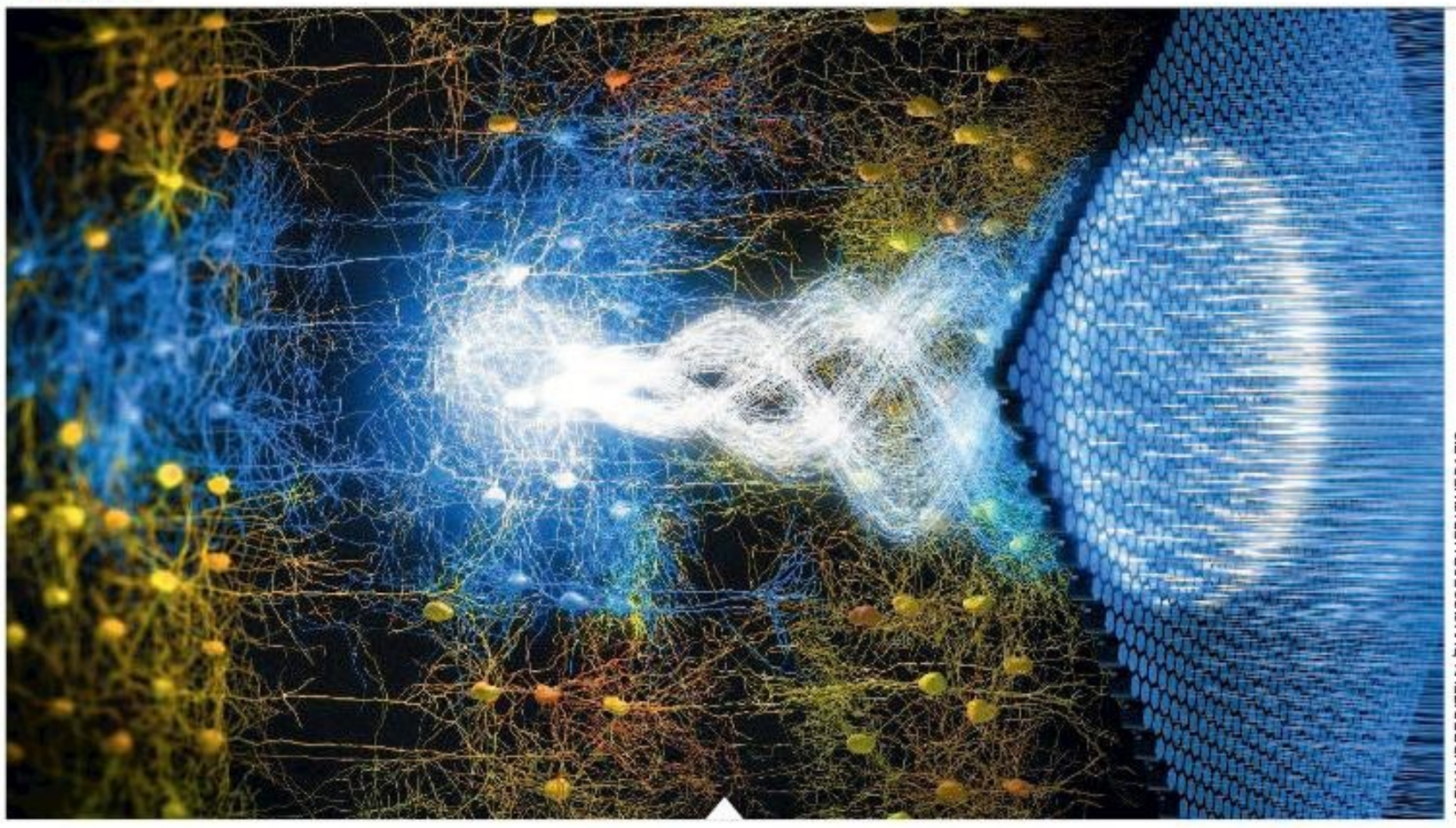
Bridgestone Europe NV/SA Succursale France - RCS 842 476 277

Pour connaître le revendeur agréé Bridgestone le plus proche de chez vous, visitez notre site internet **www.bridgestone.fr**

Pour plus de détails sur les résultats comparatifs et les indicateurs de performance du produit, veuillez scanner le code QR.

BRIDGESTONE

Des solutions pour votre mobilité



ALEXANDRE DIZEUX/PHYSICS FOR MEDICINE PARIS

Testée sur des rongeurs, la thérapie permet de stimuler les neurones à distance (vue d'artiste).

La sonogénétique pour rendre la vue

Cette nouvelle technique modifie génétiquement des neurones visuels afin de les rendre sensibles aux ultrasons.

Des ultrasons pourraient un jour être utilisés pour envoyer directement au cerveau de malvoyants l'image de leur environnement, et ainsi leur rendre la vision. C'est ce qu'anticipent des chercheurs français dans la revue *Nature Nanotechnology*, en rapportant la toute première démonstration sur le vivant de la sonogénétique. Cette technique toute récente consiste à modifier génétiquement des neurones pour les rendre sensibles aux ultrasons et permettre ainsi de les stimuler à distance. *« C'est comme une thérapie génique : avec une injection, on introduit le code génétique d'un canal ionique mécanosensible [un type de protéine sensible au stress mécanique] identifié chez des bactéries »*, explique Serge Picaud, directeur de l'Institut de la vision à Paris et coauteur de ces travaux. Dans le cas présent, seuls les neurones stimulateurs du cortex visuel ont été modifiés.

Remplacer le nerf optique lésé

Utilisée sur des souris et des rats, la sonogénétique fonctionne, montrent les chercheurs. Entraînés à s'abreuver lorsqu'ils perçoivent une lumière, les rongeurs transgéniques allaient effectivement boire à la suite d'une stimulation ultrasonore des neurones du cortex visuel mimant la perception d'un signal lumineux. *« C'est une preuve de concept, la première sur le vivant »*, se réjouit Serge Picaud. Pour l'instant, la vision n'a pas été restaurée ; seule la capacité de la technique à stimuler les neurones visuels a été démontrée. Une excellente nouvelle toutefois, puisqu'elle permettrait en théorie de restaurer la vision de patients dont le nerf optique a été lésé (par un glaucome, un diabète ou une maladie héréditaire). *« Une caméra montée sur des lunettes par exemple capturerait des images visuelles, qui seraient converties en signaux ultrasonores. Ce sont ces signaux qui formeraient une image ultrasonore dans le cortex visuel en activant les neurones »*, explique Serge Picaud. Avant d'atteindre cet horizon, il faudra encore comprendre quels neurones stimuler pour faire apparaître telle ou telle image. ■ **C. G.**

Une bague qui surveille la santé

E-SANTÉ Fondée par des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), la start-up Senbiosys a présenté le plus petit capteur de photopléthysmographie au monde, une technologie utilisée dans les montres et bracelets connectés pour mesurer la fréquence cardiaque notamment. Une miniaturisation qui permet d'intégrer le système de suivi de santé à une bague, dont les performances sont similaires aux dispositifs actuels. **H. J.**

EPFL

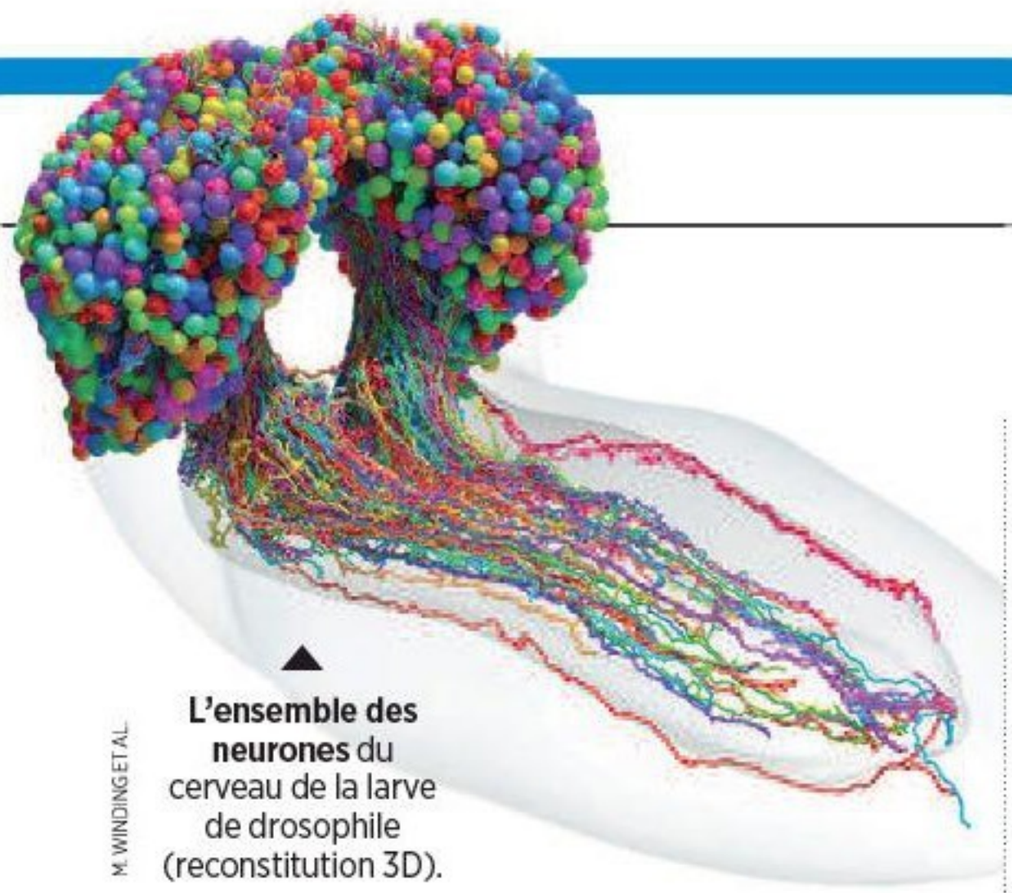
L'anneau de 2,5 mm d'épaisseur est équipé de six capteurs.

0,001 %

La part de la population mondiale exposée à un air non pollué

SANTÉ PUBLIQUE Une étude australienne, la première portant sur la pollution atmosphérique quotidienne mondiale, évalue à 99,999 %, la part de la population exposée à des niveaux de particules fines (PM 2,5) supérieurs aux seuils recommandés par l'Organisation mondiale de la santé (5 microgrammes par mètre cube d'air). Seulement 0,18 % de la superficie terrestre serait épargnée par ces particules de 2,5 micromètres de diamètre. **E. T.**

SOURCE : WENHUA YU, UNIVERSITÉ MONASH, AUSTRALIE.



M. WINDING ET AL.

L'ensemble des neurones du cerveau de la larve de drosophile (reconstitution 3D).

La première carte complète d'un cerveau

NEUROSCIENCES 3016 neurones connectés par 548 000 synapses, c'est ce qui apparaît sur le tout premier connectome — plan complet des connexions neuronales d'un cerveau — réalisé sur un insecte, en l'occurrence une larve de mouche (*Drosophila melanogaster*). *« Ce que nous apprenons chez la mouche aura des implications pour décoder le cerveau humain »*, promettent les auteurs de l'étude. **H. J.**

SOURCE: MICHAEL WINDING, UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE, ÉTATS-UNIS.

Une hormone permet d'effacer l'ivresse

PHARMACOLOGIE Traitées à l'aide d'une hormone de croissance (FGF21) habituellement produite dans le foie, des souris très alcoolisées récupéraient plus vite leur capacité à se mettre debout et à faire de l'exercice. Sans pour autant accélérer l'élimination de l'alcool dans le sang, précise l'étude. Ainsi, seuls les effets de l'ébriété seraient réduits, pas les conséquences néfastes de l'alcool sur la santé. **N. G. C.**

SOURCE: MIHWA CHOI, UNIVERSITÉ DU TEXAS, ÉTATS-UNIS.

GERIATRONICS

« Garmi » (ici prenant la tension lors d'un test) est destiné aux Ehpad.

Les robots arrivent en gériatrie

GÉRIATRONIQUE « Garmi », c'est le nom de ce robot de « gériatronique », discipline émergente mettant les nouvelles technologies au service de la gériatrie. Conçu par une dizaine de chercheurs et médecins spécialisés en Allemagne, il apprend notamment à manipuler le stéthoscope ou à prendre la tension sous la supervision d'un soignant qui pilote ses actions à distance. Les chercheurs espèrent le voir d'ici à 2030 comme aidant au quotidien en Ehpad. **H. J.**

SOURCE: ABDELDJALLIL NACERI, UNIVERSITÉ TECHNIQUE DE MUNICH, ALLEMAGNE.

EN DEUX MOTS

ASTHME Un candidat-vaccin contre l'asthme allergique, développé en France par l'Inserm, a montré des résultats prometteurs contre l'inflammation des bronches. **LONGÉVITÉ** La France compte environ 30 000 personnes de 100 ans ou plus selon l'Insee, dont 86 % de femmes, soit la plus forte proportion de centenaires en Europe. **CANCER** Une étude américaine montre que les médicaments anti-nausées pris après une séance de chimiothérapie sont plus efficaces lorsque le patient écoute sa musique préférée.

Le paradoxe cardiaque de l'obésité résolu

En changeant les critères d'analyse, des chercheurs constatent que le surpoids est bien un facteur de risque.

Non, les personnes en surpoids ou obèses ne sont pas moins susceptibles de mourir d'une maladie cardiaque. Une nouvelle étude vient battre en brèche ce « paradoxe de l'obésité », forgé sur la base d'études de cohorte de patients coronariens ou insuffisants cardiaques, qui observaient une diminution de la mortalité globale chez ceux de plus de 65 ans ayant une obésité modérée, par rapport aux patients de poids normal. Fondé sur l'indice de masse corporelle (IMC), le paradoxe s'effondre lorsqu'on remplace l'IMC (rapport poids/taille au carré) par le rapport tour de taille de la ceinture abdominale/taille. De fait, les cellules graisseuses favorisent l'inflammation dans l'organisme, et l'accumulation de graisse autour de la taille est donc bien plus dangereuse pour la santé que l'obésité en général. Les chercheurs suggèrent que le rapport tour de taille/taille devrait remplacer l'IMC pour mieux évaluer le risque cardiaque individuel. **H. J.**

SPL/BSIP

L'accumulation de graisse autour de la taille est plus dangereuse pour le cœur que l'obésité en général.

IL A DIT

« *Certaines personnes sont prosopagnosiques sans s'en rendre compte, elles pensent que tout le monde est comme elles* »

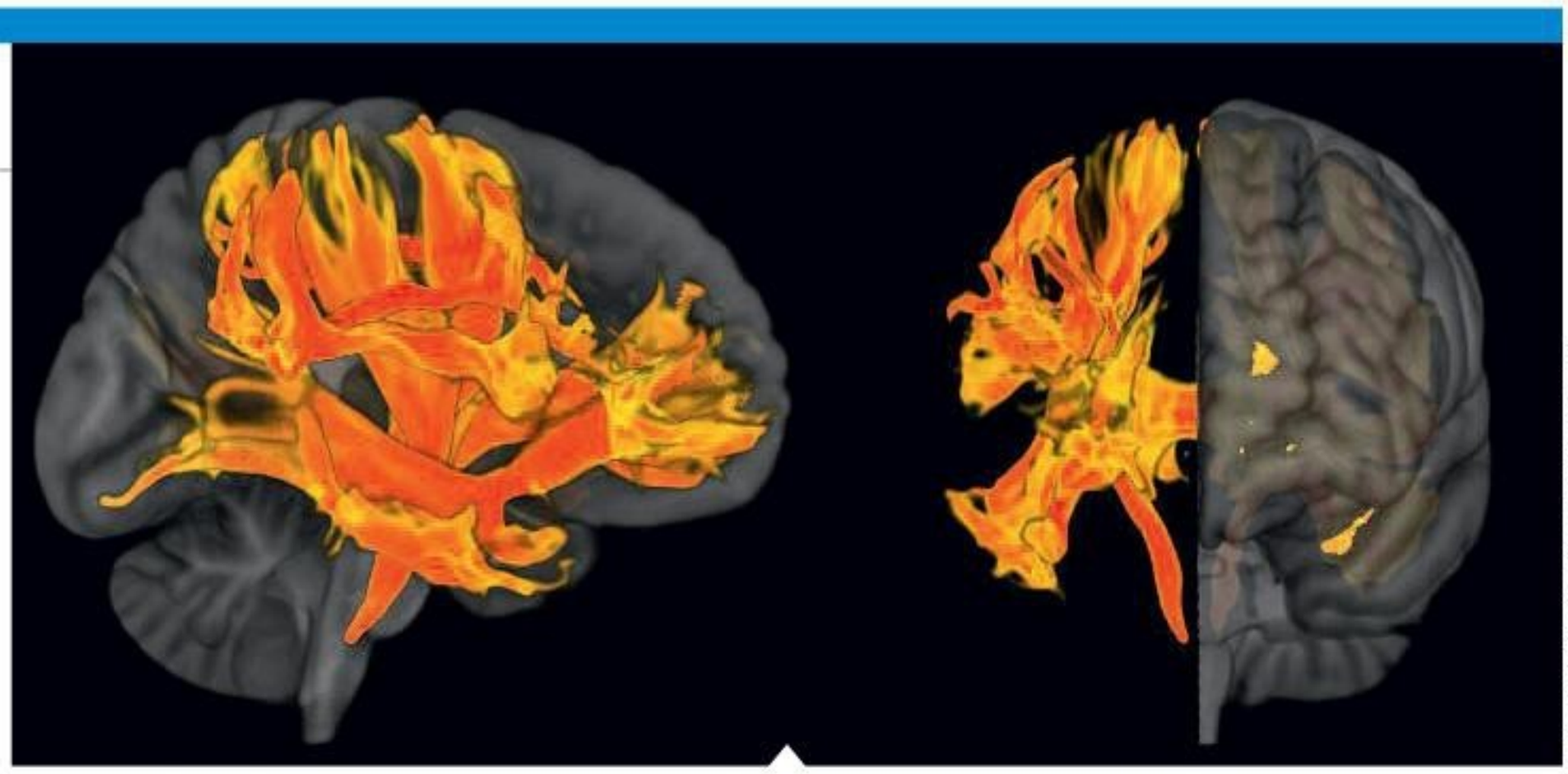
Pr Olivier Martinaud, neurologue au CHU de Caen, en réaction à une étude américaine évaluant à 3 % la part de personnes touchées par l'incapacité de naissance, partielle ou totale, à reconnaître les visages.

INSULET

La pompe à insuline se pose sur la peau sans tubulure.

Le pancréas artificiel adapté aux enfants

DIABÉTOLOGIE Très attendu en France et disponible aux États-Unis depuis l'été 2022, le premier système d'insulinothérapie dit en boucle fermée sans tubulure, se posant directement sur la peau par le biais d'un patch, démarre ses essais dans l'Hexagone. Ce pancréas artificiel sera utilisé chez des adultes et des enfants âgés de 2 à 18 ans, tous atteints d'un diabète de type 1. Il vient compléter la liste de dispositifs différents déjà disponibles (Medtronic 780G, Tandem Control-IQ, Diabeloop DBLG1, CamDia APS). **S. R.-M.**



DR L. CARNEVALE, IRCCS IN MNEURIMED, POZZILLI

Des lésions (en rouge et jaune) apparaissent dans la substance blanche du cerveau d'un hypertendu (reconstruction 3D).

Comment l'hypertension endommage le cerveau

L'analyse de ces zones cérébrales permettrait d'identifier les personnes à risque de déclin cognitif.

Pour la première fois, des scientifiques ont pu identifier des régions spécifiques du cerveau endommagées à long terme par l'hypertension artérielle. En croisant des données cliniques, génétiques et d'IRM cérébrales de 3395 patients présentant une pression sanguine trop élevée, neuf zones cérébrales ont été cernées. Notamment le putamen, structure centrale impliquée dans la régulation des mouvements et lésée dans la maladie de Parkinson. Mais la dégradation des fonctions cognitives, définies ici par le score d'intelligence fluide (capacité à raisonner et à s'adapter à de nouvelles situations), était davantage associée à l'atteinte de zones de la substance blanche, ces fibres nerveuses dans la partie interne du cerveau qui permettent de relier les différentes aires du cortex. La découverte rapportée dans l'*European Heart Journal* pourrait aider « *à identifier les personnes à risque de déclin cognitif à un stade précoce* », selon Joanna Wardlaw, coauteure de l'étude pilotée par l'université d'Édimbourg (Écosse). ■ **H. J.**

PLAINPICTURE

Misophonie, de l'agacement au trouble neurologique

ORL **Près de 20 % des Britanniques seraient atteints de misophonie. C'est le résultat d'une étude épidémiologique sur l'agacement suscité par certains sons comme le crissement d'une craie sur un tableau ou le tapotement d'ongles, faisant de cette gêne un véritable trouble neurologique. Surtout, 98 % des personnes concernées ignorent leur condition, renforçant parfois une sensation d'isolement. Aucune étude de ce genre n'a jamais été menée en France.** **H. R.**

SOURCE : SILIA VITORATOU, KING'S COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

Des risques génétiques de dépression spécifiques aux femmes

PSYCHIATRIE L'étude de la plus vaste banque de données génétiques et de santé du monde, la UK Biobank, a révélé des gènes spécifiques liés à la dépression majeure chez les femmes. Ils codent notamment pour des récepteurs à deux neurotransmetteurs, la dopamine et le glutamate, essentiels dans le processus dépressif. Chez les hommes, moins sujets à la dépression, l'étude a identifié moins de gènes liés à la maladie. **P. K.**

SOURCE : PATRICIA PELUFO SILVEIRA, UNIVERSITÉ MCGILL, CANADA.

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

& Challenges

DÉCOUVREZ VOTRE NOUVEAU RENDEZ-VOUS À PARTIR DU 11 MAI

12 conversations surprenantes
par **Erik ORSENNA**

LE FUTUR DE L'ÉNERGIE

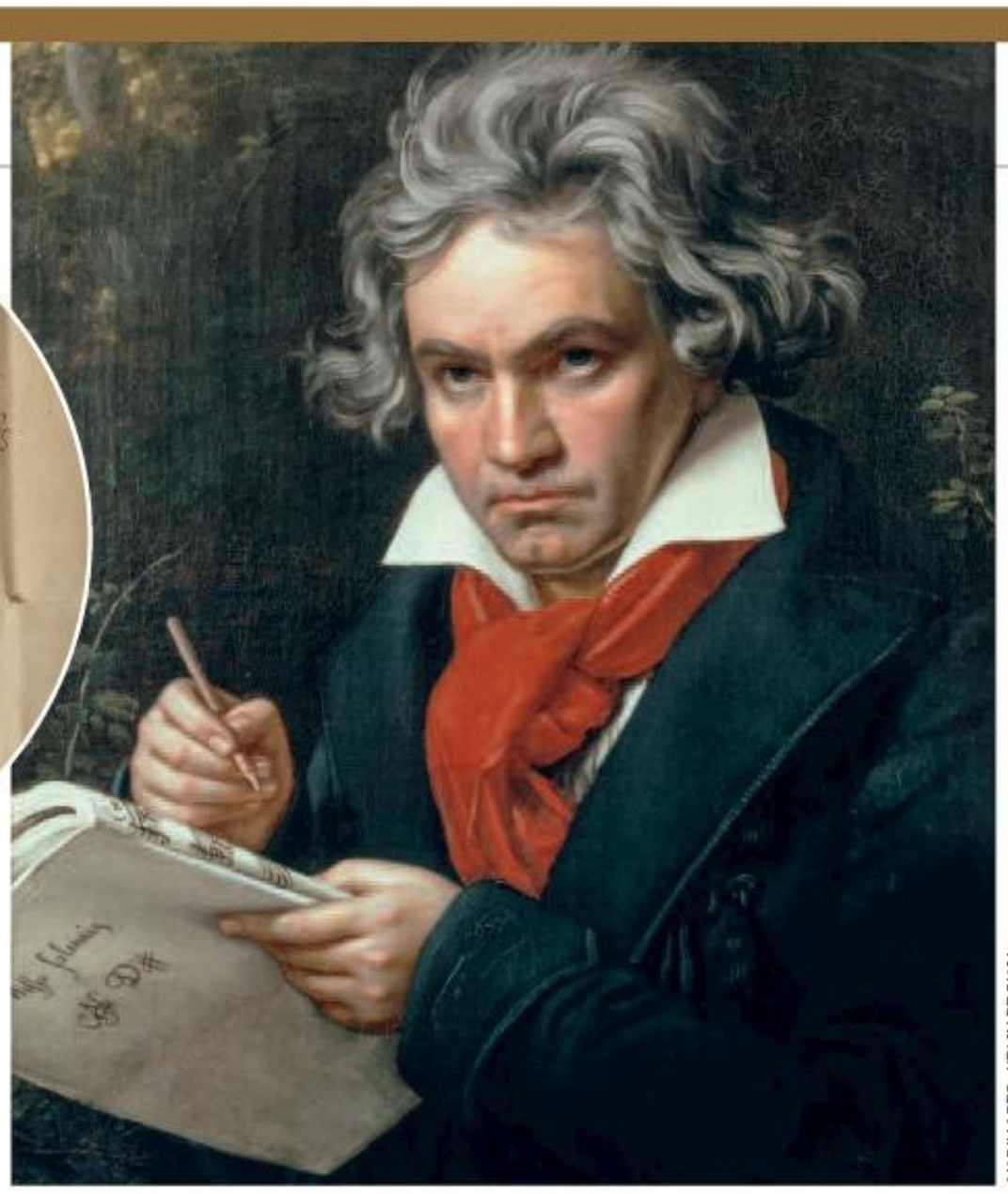
© Bernard Matussière

Podcasts disponibles sur :
www.sciencesetavenir.fr
& www.challenges.fr

Avec le soutien de

ENGIE

La mèche de « Stumpff », l'une des cinq authentifiées comme appartenant à Ludwig van Beethoven (ci-contre peint en 1820), et dont l'ADN a été extrait pour être analysé.



AKG IMAGES - KEVIN BROWN

L'ADN de Beethoven séquencé

Les chercheurs ont pu confirmer sa maladie du foie, mais n'ont pu détecter en revanche aucune trace génétique de sa surdité.

Avant sa mort en 1827 à l'âge de 56 ans, Ludwig van Beethoven avait légué 34 mèches de ses cheveux. Sans se douter que cinq d'entre elles, éparpillées chez des collectionneurs à travers le monde, seraient authentifiées 196 ans plus tard pour en extraire son ADN et le séquencer. C'est ce qu'a fait une équipe pilotée par l'institut Max-Planck de science de l'histoire humaine, en Allemagne, qui publie ses résultats dans la revue *Current Biology*. Les analyses révèlent que le célèbre compositeur était porteur de deux exemplaires (homozygotie) d'une variante du gène PNPLA3, connue pour être « *le plus grand facteur de risque génétique de maladie du foie, suggérant qu'il a hérité d'une prédisposition considérable* ». Une découverte qui confirme les écrits du compositeur — rapportant entre autres des crises de jaunisse — et son autopsie : Beethoven était atteint d'une maladie du foie, dont les premiers symptômes se sont déclarés six ans avant sa mort due à une cirrhose.

En revanche, même l'analyse complète de son ADN n'aura pas résolu le mystère de la terrible surdité qui frappa le compositeur au tournant de la trentaine. Aucune cause génétique simple ne peut expliquer cette perte d'audition. « *À l'avenir, d'autres gènes liés à des surdités pourraient être identifiés et recherchés ensuite dans le génome de Beethoven* », espère toutefois l'archéogénéticien Johannes Krause, qui a dirigé ces travaux.

Un ancêtre qui n'en était pas un

Plus surprenant : en recoupant les données génétiques avec les documents d'archives, l'étude révèle un écart entre les généalogies légale et biologique de Ludwig van Beethoven. Autrement dit, l'un des hommes de la lignée paternelle reliant Aert (1535-1609) à Ludwig (1770-1827) ne serait pas le père biologique de son héritier. Sur les sept générations concernées, impossible toutefois de déterminer quelle madame van Beethoven s'est montrée infidèle. ■ **C. G.**

IL A DIT

« Nous avons fait une boulette de viande de mammouth pour dire que l'alimentation peut être plus durable »

Tim Noakesmith, cofondateur de la start-up australienne Vow de viande cellulaire, à la présentation d'une boulette de viande cultivée à partir d'une séquence ADN de mammouth laineux.

Des gravures contemporaines de Lascaux mises au jour près de Nîmes

PRÉHISTOIRE Une équipe d'archéologues de l'Inrap a mis au jour des gravures de chevaux de profil sur le site d'un campement de chasseurs préhistoriques à Bellegarde, près de Nîmes (Gard). Réalisées sur de petites tablettes de calcaire, les œuvres datent du début de la période magdalénienne, il y a près de 20 000 ans, et figurent ainsi parmi les plus anciennes connues pour cette culture du paléolithique, au même titre que les peintures pariétales de Lascaux. **H. J.**

P. GUYOT / AFP

Une figure de cheval gravée sur une plaquette de calcaire vieille de 20 000 ans environ.

hellio

Jusqu'à
60 %
d'économies
d'énergie

Baissez vos factures d'énergie en installant des panneaux solaires

Produisez une énergie 100 %
renouvelable et locale chez vous
grâce au photovoltaïque

Votre énergie a de l'impact

hellio

Simulez votre projet
particulier.hellio.com
ou au 01 87 66 61 93

Avis Vérifiés
★★★★☆ 4,2/5
sur 4 490 avis

Les télescopes de Huygens révèlent sa myopie

Sans avoir conscience de son handicap, l'astronome concevait ses télescopes en les adaptant à sa vue.

R.IJKSMUSEUM BOERHAAVE, LEIDEN

Les lentilles conçues par le savant néerlandais du XVIIe siècle (portrait au fond) produisaient des images avec une résolution moins nette que celle qui pouvait être obtenue par les télescopes de son époque.

Comble de l'histoire : connu pour la découverte des anneaux de Saturne grâce à un télescope de sa fabrication, Christiaan Huygens (1629-1695) était vraisemblablement myope. Il ne pouvait pas voir clairement les objets éloignés et, sans s'en douter naturellement, sa vision aurait pu être corrigée par des lunettes de -1,5 dioptrie. C'est le résultat d'une étude menée à l'université de Stockholm (Suède) sur les télescopes construits il y plus de 300 ans par l'astronome néerlandais. Alors même qu'ils sont de la plus haute qualité, ces derniers ne produisent pas d'images aussi nettes que ceux de ses contemporains. Or Christiaan Huygens concevait ses télescopes par un processus d'essais et d'erreurs sur différentes combinaisons de lentilles oculaires. À l'examen des instruments, il s'avère qu'il avait ainsi compensé, avec précision et sans le savoir, sa légère myopie pour que ses instruments lui donnent une vision nette du ciel. ■ **H. J.**

Une des agrafes de fer qui servaient à sceller les pierres entre elles.

CNRS PHOTOTHÈQUE

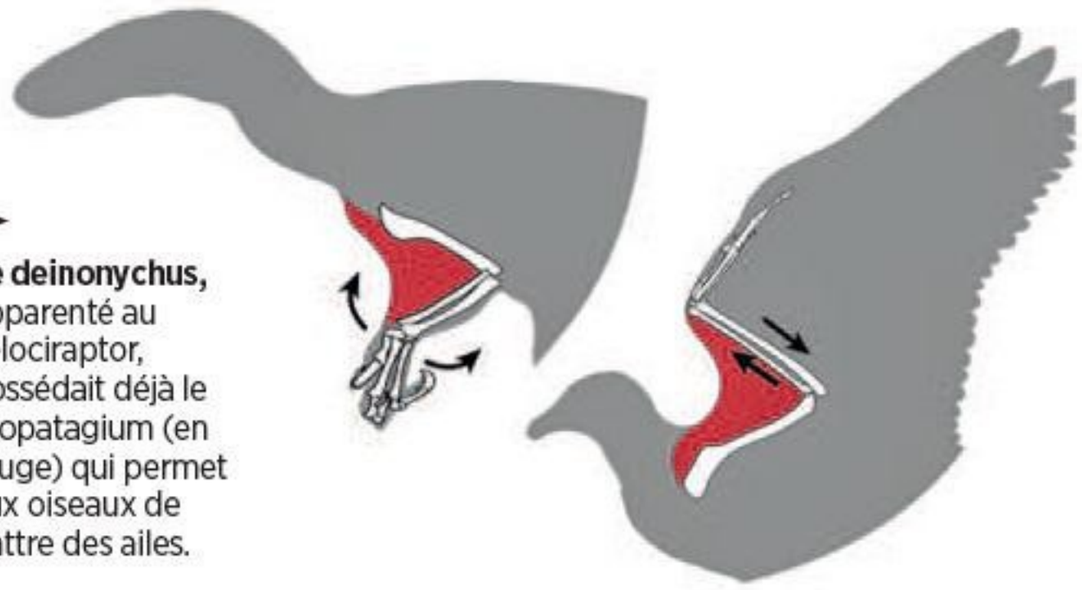
Une solidité de fer pour Notre-Dame de Paris

ARCHITECTURE Un des secrets de construction de la cathédrale Notre-Dame de Paris a été levé. L'incendie du 15 avril 2019 qui a ravagé la structure a révélé des centaines d'agrafes de fer longues de 25 à 50 cm qui maintiennent ensemble les pierres de la cathédrale. Dès les années 1160, pour ériger l'édifice le plus haut d'Europe à l'époque, les bâtisseurs ont inauguré un usage massif de cette technique qui sera ensuite reprise pour les autres églises gothiques. **P. K.**

SOURCE : MAXIME L'HÉRITIER, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

Des patins à glaces vieux de 3500 ans

ARCHÉOLOGIE Une équipe de l'université de l'Académie chinoise des sciences à Pékin a mis au jour des lames de patins à glace dans un complexe funéraire dans la région de Xinjiang, dans le nord-ouest de la Chine. Datés d'environ -3500 ans, ils sont faits d'un morceau d'os droit percé de trous pour être attachés par des lanières de cuir. Ils s'avèrent très ressemblants à ceux trouvés en Europe, dont le plus ancien, découvert au fond d'un lac suisse, est daté de -5000 ans. **H. J.**



2023 YURIKA UNO AND TATSUYA HIRASAWA

Le deinonychus, apparenté au vélociraptor, possédait déjà le propatagium (en rouge) qui permet aux oiseaux de battre des ailes.

L'aile est apparue chez les vélociraptors

ÉVOLUTION La structure morphologique qui permet aux oiseaux de battre l'air de leurs ailes, le propatagium auquel s'attache le muscle propatagialis, est apparue il y a entre 80 et 70 millions d'années chez des théropodes maniraptoriens dont font partie les vélociraptors. L'angle d'ouverture du coude s'est révélé un bon indicateur de la présence ou de l'absence de ce muscle sur les fossiles non aviens. L'aile à proprement parler est donc apparue avant les oiseaux. **H. J.**

SOURCE : TATSUYA HIRASAWA, UNIVERSITÉ DE TOKYO, JAPON.

Les escargots, mets préhistorique de choix

ANTHROPOLOGIE L'analyse de milliers de coquilles retrouvées dans la grotte de Border Cave (Afrique du Sud) montre que de grands escargots terrestres africains (*Achatinidae*) y étaient apportés par *Homo sapiens*, rôtis au feu et consommés. Une pratique qui a eu cours de -170 000 ans à -70 000 ans et fait donc de ce site le plus ancien connu où cette stratégie de subsistance est enregistrée. **H. J.**

SOURCE : MARINE WOJCIESZAK, UNIVERSITÉ DU WITWATERSRAND, AFRIQUE DU SUD.

Le très long cou de « Mamenchisaurus »

PALÉONTOLOGIE Six fois plus long que celui d'une girafe! Le cou de *Mamenchisaurus sinocanadorum*, un sauropode qui vivait il y a environ 150 millions d'années en Chine, avec ses 15,1 m de long, bat tous les records. Pour réussir à tenir, ce cou était léger : édifié avec des vertèbres creuses remplies d'air et renforcé par des structures osseuses complexes appelées lames. Ainsi équipé, ce dinosaure pouvait brouter sans se déplacer et conserver son énergie. **J. I.**

SOURCE : ANDREW MOORE, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE NEW YORK, ÉTATS-UNIS.

JULIA D'OLIVEIRA

Des vertèbres cervicales légères permettaient à « M. sinocanadorum » de supporter le poids de son cou long de 15,1 mètres.

Les momies aident à reconstituer le climat passé

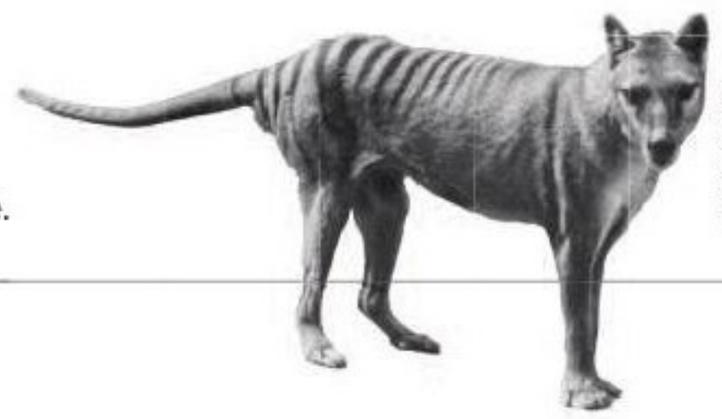
DENDROCHRONOLOGIE Pour reconstituer les fluctuations climatiques durant l'Égypte romaine (-30 avant J.-C. à 330 après J.-C.), une étude s'est portée sur des plaquettes en bois gravé qui étaient apposées sur les corps des momies pour les identifier après l'embaumement. De véritables « pierres de Rosette » climatiques, selon les dendrochronologues qui analysent les cernes de croissance des arbres dans ces morceaux de bois pour déterminer notamment les périodes de sécheresse. **H. J.**

SOURCE : FRANÇOIS BLONDEL, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, SUISSE.

Le tigre de Tasmanie aurait disparu récemment

ÉCOLOGIE **Alors qu'on pensait l'espèce disparue avec le dernier spécimen mort en 1936 au zoo d'Hobart en Tasmanie (Australie), les thylacines pourraient avoir survécu jusqu'à la fin des années 1980. L'analyse minutieuse de 1237 observations présumées du tigre de Tasmanie après 1910 montre qu'il aurait survécu dans des régions sauvages du sud-ouest de l'île au moins entre les années 1940 et 1970.** **H. J.**

SOURCE : BARRY BROOK, UNIVERSITÉ DE TASMANIE, AUSTRALIE.



GAMMA-RAPHO

Le thylacine du zoo d'Hobart (Tasmanie), mort en 1936, ne serait pas le dernier représentant de l'espèce.

SHUTTERSTOCK - SAGALASSOS ARCHAEOLOGICAL PROJECT RESEARCH - NASA - RALPH ARAQUE GONZALEZ

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

MATHÉMATIQUES

« J'apprécie les suites de nombres qui ont une définition simple »

Il y a 50 ans naissait la première encyclopédie de séquences de nombres entiers. Derrière les 2372 suites de l'ouvrage, se trouve le mathématicien britanno-américain Neil Sloane, qui n'a eu de cesse de faire évoluer sa collection, aujourd'hui riche de 360 000 séquences. Grand entretien à lire sur le site de *La Recherche*. **http://bit.ly/3m863qm**

RENDEZ-VOUS

Les podcasts de « Sciences et Avenir »

Retrouvez nos journalistes dans « Sixième Science », le podcast de vulgarisation scientifique réalisé avec *20 Minutes*.
sciav.fr/915podcast

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Des clous contre les revenants

Des clous tordus, des briques et de la chaux. Telle était l'une des recettes contre le retour d'un défunt parmi les vivants chez les Romains.
sciav.fr/915clous

5 minutes

Un astéroïde sous étroite surveillance

Découvert en février, un astéroïde de 50 m a été placé en *pole position* des géocroiseurs constituant un risque pour notre planète. Suivez son évolution.
sciav.fr/915menace

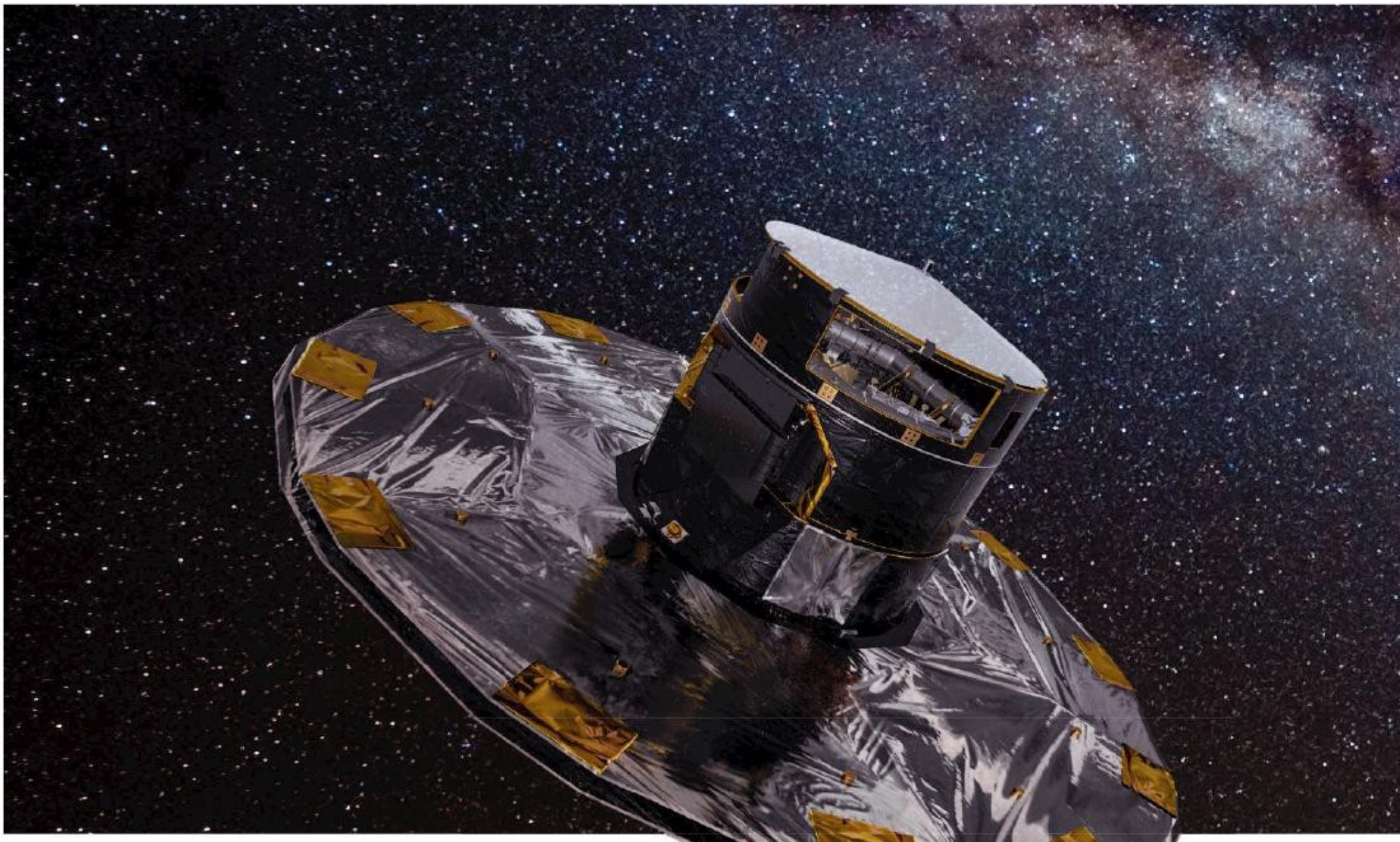
10 minutes

Aux origines ibères de l'acier

Avant même que ne commence l'âge du fer en Europe, une enquête archéologique montre que la métallurgie de l'acier se pratiquait déjà en Espagne il y a 2900 ans.
sciav.fr/915acier

SHUTTERSTOCK - SAGALASSOS ARCHAEOLOGICAL PROJECT RESEARCH - NASA - RALPH ARAQUE GONZALEZ

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook



ESA/ATG MEDIALAB; BACKGROUND: ESO/S. BRUNIE

Voie lactée

Son nouveau visage se dessine

Les résultats du satellite Gaia permettent d'affiner nos connaissances sur la formation de notre galaxie. Les plus anciennes étoiles dateraient de seulement 800 millions d'années après le Big Bang. Mieux : des collisions avec des galaxies naines et même des absorptions de galaxies sont maintenant documentées. Bienvenue dans l'ère de l'archéologie cosmique.

Par Franck Daninos @fdaninos

▲ **Le satellite européen Gaia,** en orbite à 1,5 million de kilomètres de la Terre, a permis d'établir des cartes détaillées de la Voie lactée, de suivre le déplacement des astres et de trouver les traces d'événements ayant eu lieu aux premiers stades de sa formation.

Ces astronomes se présentent eux-mêmes comme des « archéologues galactiques ». Ils s'attachent à reconstituer l'évolution de l'ensemble de notre galaxie, la Voie lactée, qui contient quelque 200 milliards d'étoiles… et dont les prémices remontent au début de l'Univers lui-même, il y a plus de 13 milliards d'années ! Pour fouiller ses recoins et identifier les traces fossiles d'événements qui ont façonné son existence, ils utilisent des instruments d'une précision inouïe, comme le télescope Sloan Digital Sky Survey, situé à l'observatoire d'Apache Point aux États-Unis. Mais surtout, le satellite Gaia de l'Agence spatiale européenne (ESA), qui orbite à 1,5 million de kilomètres de la Terre et *« révolutionne depuis quelques années la science de l'archéologie galactique »*, constate Georges Kordopatis, de l'observatoire de la Côte-d'Azur. En inspectant chaque jour près de 70 millions d'étoiles, il a permis d'établir des cartes prodigieusement détaillées, de discerner de nombreuses sous-structures et dévoiler des phénomènes insoupçonnés jusqu'alors. *« Nous avons désormais une vision beaucoup plus claire de la manière dont notre galaxie s'est développée au cours de son histoire, s'*émerveille Carine Babusiaux, de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble. *Une évolution bien plus complexe et mouvementée qu'on ne l'imaginait, sous l'effet de processus se déroulant aujourd'hui encore. »*

70 millions
d'étoiles sont inspectées quotidiennement par le satellite Gaia, lancé en 2013 par l'Agence spatiale européenne.

Cela fait environ un siècle que les astronomes ont compris que notre galaxie était dominée par un immense disque en rotation de quelque 100 000 années-lumière de diamètre. Puis, à partir des années 1950, ils se sont rendu compte que ce disque était constitué de plusieurs « bras » principaux où la densité d'étoiles est particulièrement importante et qui s'enroulent en spirale autour d'un bulbe, même si leur nombre (quatre ou davantage) reste à ce jour incertain. Le Soleil se situe dans un arc de plus petite taille, appelé bras d'Orion, à mi-distance du centre galactique. C'est pour cette raison que la Voie lactée apparaît comme une bande lumineuse ▶

OBSERVATIONS

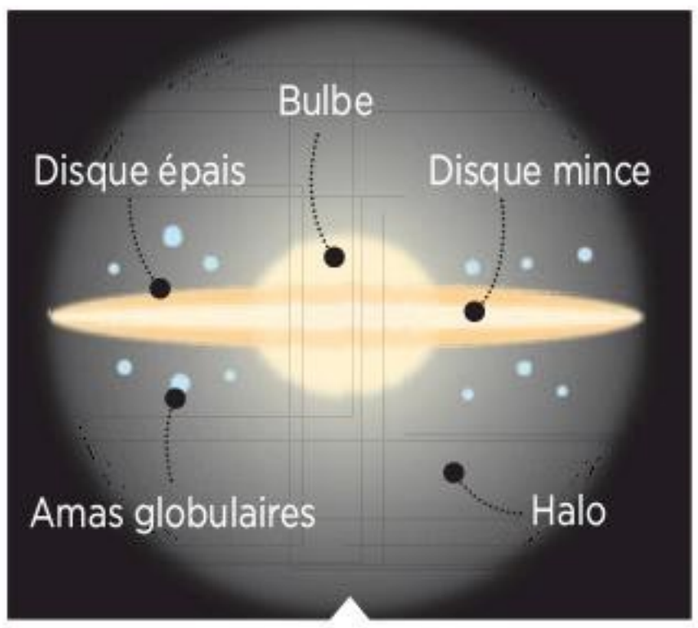
Un possible cinquième bras

Détectée en 2021 par le radiotélescope chinois FAST, une immense boucle d'hydrogène gazeux intrigue les astrophysiciens. Par ses dimensions titanesques, tout d'abord. Les données de FAST indiquent qu'elle mesurerait 3600 années-lumière de long pour 670 de large. Et s'étirerait même sur 16000 années-lumière selon les mesures complémentaires du télescope d'Effelsberg en Allemagne. Il pourrait donc s'agir du plus grand filament de gaz de notre galaxie, avancent les scientifiques chinois qui l'ont découvert… À moins qu'il ne trahisse l'existence d'un cinquième et nouveau bras spiral de la Voie lactée ! Contrairement aux autres structures de ce type, celle-ci est cependant très éloignée du centre galactique (à plus de 70 000 années-lumière) et ne suit pas exactement la forme de son disque. Les observations en cours devraient permettre de trancher.

dans le ciel nocturne, car nous contemplons son disque depuis l'intérieur par la tranche. D'autres composantes ont été repérées à partir des années 1980. En particulier, le fait que le plan galactique est composé d'un « disque mince » renfermant les bras spiraux et la majorité des étoiles, enveloppé d'un disque épais moins étendu mais trois fois plus haut (6000 années-lumière). Un gigantesque halo sphérique de faible densité stellaire englobe finalement le tout.

La position d'un nombre faramineux d'étoiles a été établie

Comment ces structures se sont-elles organisées ? D'où viennent les astres qu'elles contiennent ? Pour le savoir, les archéologues galactiques ont besoin d'identifier les étoiles qui partagent des origines communes et sont toujours « raccordées » entre elles par leur composition, leur âge et leur cinématique. Or, ces caractéristiques ne peuvent être déduites qu'en connaissant préalablement leur position exacte. « *Une information qui ne peut être obtenue, elle-même, de manière directe,* rappelle Céline Reylé, de l'Observatoire des sciences de l'Univers de Franche-Comté/Bourgogne. *Lorsqu'on identifie deux astres ayant le même éclat, on ne peut savoir s'il s'agit d'une lanterne proche ou d'un phare lointain.* » Les chercheurs utilisent ainsi la méthode de la parallaxe. Elle consiste à examiner un objet à deux emplacements différents et à mesurer son mouvement apparent — en l'occurrence un angle — par rapport à un arrière-plan très lointain considéré comme fixe. Or, ce mouvement est d'autant plus important que l'objet est proche, la distance étant ensuite calculée par une formule trigonométrique. Grâce à cette méthode et en tirant profit de la rotation de la Terre autour du Soleil, le télescope spatial Hipparcos de l'ESA a pu localiser 120000 étoiles dans les années 1990.



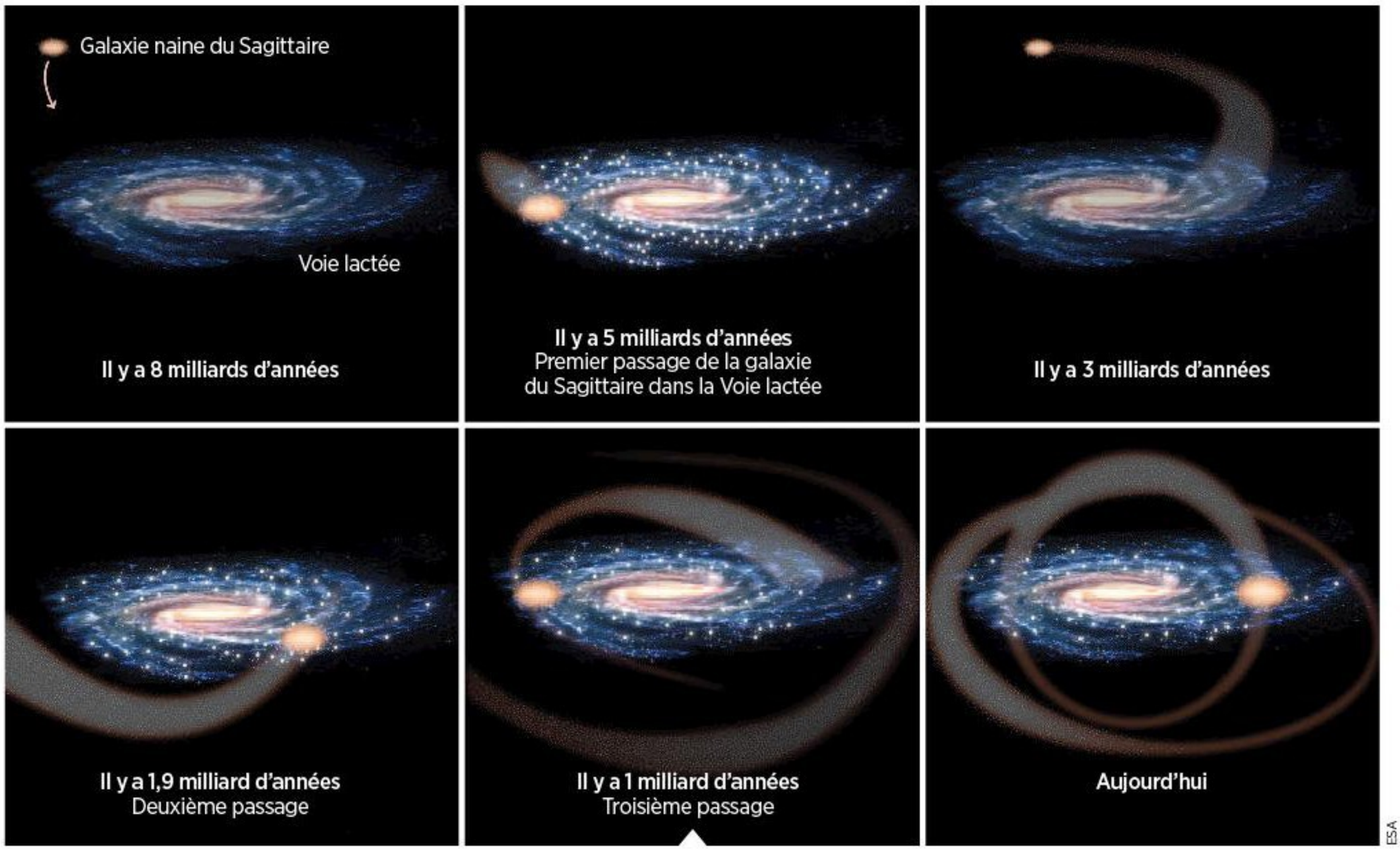
BRUNOBOURGEOIS

Les grandes structures de la Voie lactée comprennent un disque fin et un disque épais en rotation autour d'un bulbe central. Ils sont enveloppés par un gigantesque halo contenant des amas globulaires d'étoiles.

Mais son successeur, Gaia, satellisé en 2013, a réalisé un saut prodigieux. Il résout des angles mille fois plus petits qu'Hipparcos, de seulement un milliardième de degré — « *soit la taille d'une pièce d'un euro vue depuis une distance équivalente à celle qui sépare la Terre de la Lune* », souffle Céline Reylé. La position d'un nombre faramineux d'étoiles a pu être ainsi établie. Et en mesurant celle-ci plusieurs dizaines de fois au cours de sa mission, Gaia a pu voir bouger ces étoiles et calculer leur vitesse (dite transversale) sur la voûte céleste. « *On comprend dès lors où ces astres se dirigent et d'où ils proviennent* », s'enthousiasme Georges Kordopatis. Ce n'est pas tout. Car Gaia embarque aussi des spectromètres et spectrophotomètres mesurant les paramètres physiques (température, métallicité, etc.) des étoiles les plus lumineuses tout comme leur vitesse (dite radiale) dans la ligne de visée.

Un événement majeur au cours de la jeunesse de la Voie lactée

Des atlas « mouvants », de plus en plus détaillés, ont ainsi été divulgués à la communauté scientifique : le premier en 2016, un deuxième en 2018… puis un troisième à l'été 2022 dévoilant la position de 1,8 milliard d'étoiles ainsi qu'une foule d'autres informations. « *Avec de tels catalogues, nous pouvons étudier de grands échantillons de toutes les populations stellaires,* se réjouit Carine Babusiaux. *Car, alors que les relevés d'Hipparcos concernaient surtout les étoiles du disque mince, ceux de Gaia s'étendent au disque épais et au halo.* » En 2022, en utilisant les données de ce troisième catalogue, une équipe de l'Institut Max-Planck d'astronomie en Allemagne a mis en lumière les premiers stades de formation de



À trois reprises, la galaxie du Sagittaire a traversé la Voie lactée, entraînant des épisodes importants de formation d'étoiles.

la Voie lactée. Elle s'est concentrée sur une catégorie d'étoiles appelées sous-géantes. Ces astres correspondent à une phase particulière de la vie des étoiles, lorsque les atomes d'hydrogène ne fusionnent plus en leur cœur. Or cette étape évolutive, qui précède la transformation en géante rouge, est particulièrement brève. Elle ne dure « que » quelques millions d'années, ce qui permet de calculer l'âge des étoiles avec une faible marge d'erreur. Et c'est ce que les astronomes allemands ont effectué pour 250 000 sous-géantes localisées par Gaia dans l'ensemble de la Voie lactée.

Ils ont ainsi découvert que les plus anciens spécimens avaient commencé à se former il y a 13 milliards d'années, soit 800 millions d'années seulement après le Big Bang, au niveau du disque épais. Les régions internes du halo auraient commencé ensuite, elles aussi, à se remplir d'étoiles. Mais ce processus a connu une accélération aussi soudaine qu'importante il y a 11 milliards d'années. La conséquence, selon les chercheurs, d'un événement majeur que la Voie lactée a connu dans sa jeunesse. Elle a en effet attiré, par sa force gravitationnelle, une galaxie voisine baptisée Gaïa-Encelade, quatre fois moins massive que la nôtre… jusqu'à l'engloutir complètement ! *« Cette fusion sautait aux yeux, en 2018, dans les données du deuxième catalogue de Gaia »*, précise Carine Babusiaux, coauteure de cette découverte. Elles pointaient notamment un groupe de 30 000 étoiles très anciennes possédant des caractéris-

RÉSULTATS

Les nouvelles limites de notre galaxie

Jusqu'où s'étend la Voie lactée ? Présentées lors du congrès de l'Union américaine d'astronomie en janvier, de nouvelles observations donnent une réponse vertigineuse. Elles ont été réalisées par le télescope Canada-France-Hawaii. Et concernent 208 étoiles de type « RR Lyrae », présentes dans le halo galactique et âgées pour la plupart de plus de 10 milliards d'années.
Or, si les plus proches orbitent à 65 000 années-lumière du centre de la galaxie, la plus lointaine se situe à 1,04 million d'années-lumière. Un record !
« Ce résultat redéfinit ce qui constitue les limites extérieures de la Voie lactée », **a commenté Raja GuhaThakurta, astronome à l'université de Californie à Santa Cruz (États-Unis) qui a dirigé ces travaux.**

tiques spectrales bien particulières et se déplaçant dans des directions opposées à la majorité des autres étoiles de la galaxie. « *Les travaux des collègues allemands fournissent à présent des indications supplémentaires sur la chronologie de cette fusion.* »
Si celle-ci a sans doute été le dernier grand événement de ce type, d'autres « cannibalisations » se sont produites avant et après, selon la même logique implacable : ce sont toujours les plus grosses galaxies qui avalent les petites ! Les relevés de Gaia témoignent ainsi au minimum d'une douzaine d'autres collisions cosmiques, avec les galaxies naines du Kraken, de Thamnos ou encore du Sequoia, par exemple. Tout comme Gaïa-Encelade, elles ont contribué à faire grossir, enrichir et façonner la Voie lactée, notamment son disque mince qui aurait commencé à se former il y a 8 milliards d'années. « *Avant Gaia, on ne connaissait ni la part ni l'importance de ces accrétions,* souligne Céline Reylé. *On sait désormais qu'elles ont joué un rôle prépondérant.* »
Certaines sont même toujours en cours. L'événement le plus significatif concerne la galaxie naine du Sagittaire, de 10 000 années-lumière de diamètre. Repérée en 1994, elle se trouve à 50 000 années-lumière du centre de notre galaxie et plonge actuellement vers le bord de son disque. Or, l'analyse de sa trajectoire indique qu'elle l'a déjà traversé à au moins trois reprises : il y a cinq, deux et un milliard d'années. Et en 2020, les données de Gaia ont montré que chacun de ces passages avait entraîné des épisodes majeurs de formation d'étoiles. « *Si chaque traversée arrache au Sagittaire une partie de ses astres, elle suscite aussi des surdensités de poussières et de gaz provoquant des flambées d'étoiles* », explique Thomas Luiz Para, astronome à l'université de Groningue aux Pays-Bas.

La galaxie du Sagittaire continue d'imprimer sa marque

Mais le plus curieux est que le premier passage se serait produit au voisinage de la région où se situe le Soleil, apparu peu après il y a 4,6 milliards d'années. « *C'est n'est encore qu'une hypothèse, mais le Système solaire, notre planète et les réflexions que nous avons en ce moment pourraient donc résulter de cette rencontre* », s'ébahit le chercheur. Si la Voie lactée engloutira la galaxie du Sagittaire d'ici un ou deux milliards d'années, celle-ci continue en attendant d'imprimer sa marque. Fin 2022, grâce là encore aux observations de Gaia, une équipe internationale a constaté que les étoiles en bordure du disque de notre galaxie oscillaient et se déplaçaient de haut en bas à des vitesses différentes. « *Nous avons pu démontrer que ces ondulations, semblables à ce qui se produit lorsqu'une pierre tombe dans un lac, résultent de la chute actuelle du Sagittaire* », indique Georges Kordopatis, coauteur de l'étude. Loin d'être un système stable et à l'équilibre comme on le pensait il y a quelques années, notre galaxie est donc encore sous l'influence de puissants événements externes. ■

M. GARLICK/SPL/SUCRÉ SALÉ

Dans 4 milliards d'années, la galaxie Andromède, qui ne cesse de se rapprocher de la Voie lactée, devrait entrer en collision avec cette dernière (vue d'artiste).

CALCULS

L'inévitable fusion avec Andromède

La galaxie Andromède, d'une taille comparable à la nôtre, se situe à 2,5 millions d'années-lumière et se rapproche inéluctablement de nous. On sait en effet depuis près d'un siècle qu'elle fonce dans notre direction (celle de la ligne de visée) à la vitesse de 104 km/s. Mais sa vitesse transversale est bien plus difficile à déterminer. Grâce au télescope Gaia, de nouvelles estimations ont été réalisées en 2021 : elles indiquent qu'Andromède se déplace à une vitesse de 42 km/s vers l'est et 59 km/s vers le sud. Les incertitudes inhérentes à ces calculs sont cependant encore trop grandes pour dater précisément cette rencontre, qui — qu'on se rassure ! — ne se produira pas avant 4 milliards d'années. Les deux galaxies s'échangeront alors progressivement leurs gaz, leurs étoiles… Jusqu'à se mélanger complètement et n'en former plus qu'une, colossale, sans bras spiraux et de forme elliptique.

INSTALLER UNE BORNE DE RECHARGE EN TOUTE CONFIANCE ? ON S'EN CHARGE.

ENGIE Home Services vous accompagne pour l'installation de votre borne de recharge à domicile, c'est simple, rapide et sécurisé(1).

Plus d'infos sur mobiliteverte.engie.fr

J'agis avec ENGIE Home Services

ENGIE Home Services

L'énergie est notre avenir, économisons-la!

(1) Offre disponible pour les particuliers résidant dans une maison individuelle. Voir conditions sur mobiliteverte.engie.fr

ENGIE HOME SERVICES, SAS AU CAPITAL DE 1 121 232€, SIÈGE SOCIAL : 1 PLACE SAMUEL DE CHAMPLAIN 92400 COURBEVOIE, RCS NANTERRE 301 340 584. © Étienne Pons.

BIAIS ALGORITHMIQUE Décision d'un algorithme qui pénalise systématiquement et injustement plus qu'un autre un groupe auquel s'applique cette décision.

ÉQUITÉ ALGORITHMIQUE Principe censé garantir des résultats qui ne pénalisent pas un groupe plutôt qu'un autre, avec des taux de faux positifs et négatifs équivalents pour tous.

PRÉDICTION Résultat donné par un algorithme d'apprentissage automatique en fonction d'une analyse statistique et de corrélations issues de données passées.

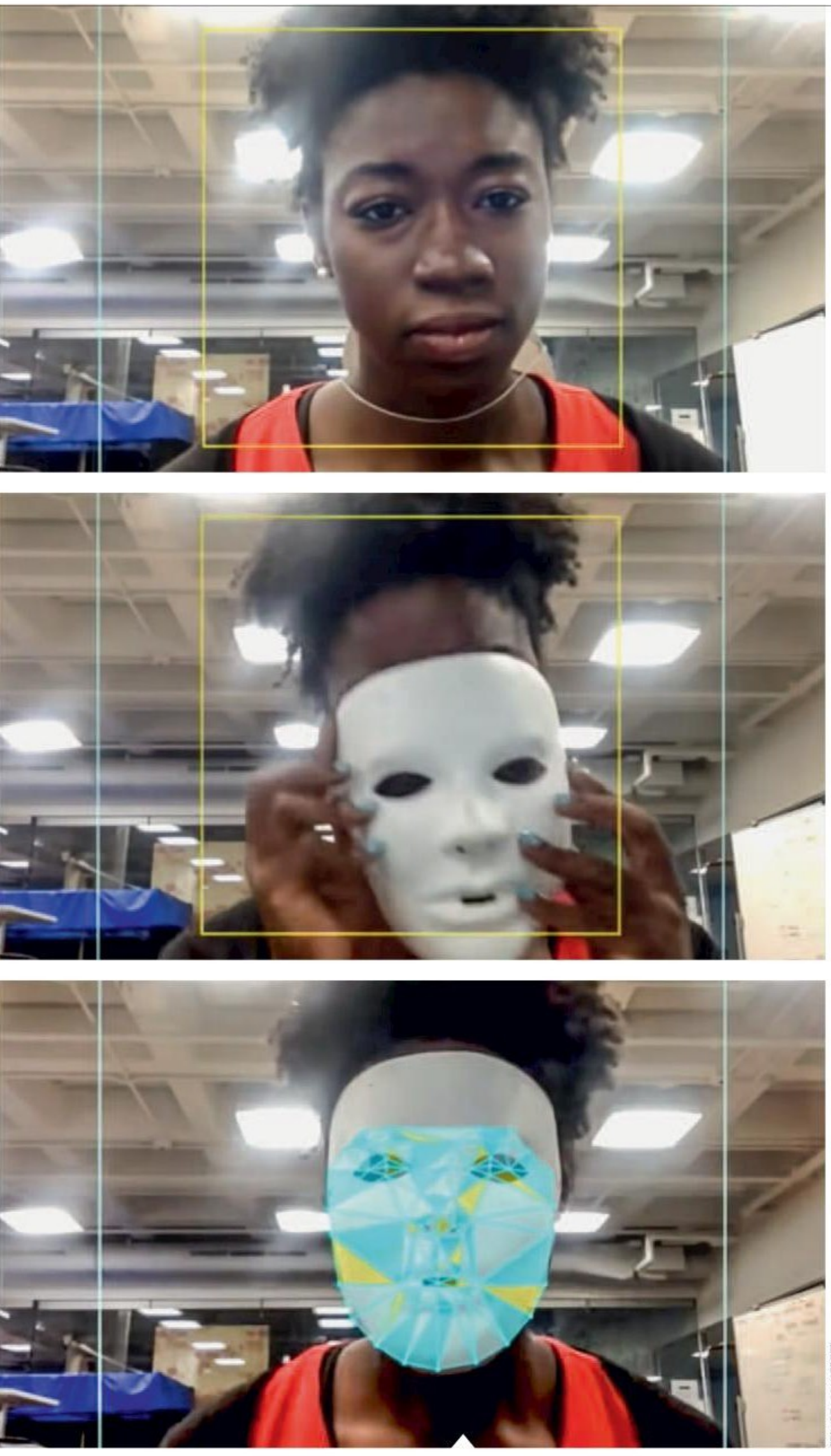
La traque sans fin des biais algorithmiques

Biais racistes, sexistes ou culturels. Qu'il s'agisse de reconnaissance ou de génération d'images, de production de texte ou de prise de décision, les algorithmes d'intelligence artificielle trahissent toujours le même travers : ils ne sont ni neutres ni objectifs. Les chercheurs sont dans l'urgence pour trouver des solutions.

Prakhar Ganesh est étudiant à l'université nationale de Singapour, spécialiste de questions d'équité et de confidentialité dans les technologies d'apprentissage automatique. À l'automne 2022, il a mobilisé cette expertise pour remporter un concours un peu particulier. Organisée par un groupe de bénévoles appelé Bias Buccaneers, la compétition consistait à développer un algorithme capable d'indiquer correctement la couleur de peau de 15 000 visages générés artificiellement, d'évaluer leur tranche d'âge et leur genre. Mais les modèles n'étaient pas jugés sur le seul taux de bonnes réponses. Ils devaient aussi afficher des performances équivalentes sur des visages à peau sombre ou claire, masculins ou féminins, jeunes ou vieux. Et face à une image sans visage, si le modèle indiquait une couleur de peau, celle-ci devait s'avérer aléatoire, aucune ne devait prédominer dans les prédictions. « *Ces critères ont été choisis en raison du fait que certaines catégories de personnes pâtissent du manque d'efficacité de modèles d'apprentissage automatique de ce genre* », explique Prakhar Ganesh. C'était tout l'objet du concours. Qualifié de « *bias bounty* », sur le modèle des programmes de récompenses « *bug bounty* » (prime au bug) dédiés à la recherche de failles de sécurité informatique, il poussait les développeurs à se préoccuper des possibles biais de leurs outils.

Cette question des biais et du manque d'équité est récurrente en intelligence artificielle (IA). « *Ce travers concerne particulièrement les IA de type statistique, les réseaux de neurones, car elles n'extrapolent jamais, elles interpolent entre leurs données,* note Jean-Louis Dessalles, maître de conférences à Télécom Paris, membre du Laboratoire de traitement et communication de l'information. *S'il existe un biais sexiste dans les données d'apprentissage, elles vont le reproduire.* »

Les travaux de la chercheuse Joy Buolamwini au Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis) ont beaucoup contribué à montrer combien les algorithmes de reconnaissance



TEDXBEACONSTREET

Un logiciel de reconnaissance faciale ne détecte pas un visage noir, alors qu'il identifie un masque blanc. C'est ce que la chercheuse Joy Buolamwini a observé sur elle-même.

faciale fonctionnaient beaucoup moins bien sur des femmes noires que sur des hommes blancs. Des tests ont révélé une discrimination envers les Noirs dans le logiciel Compas, qui évalue le risque de récidive d'un détenu pour le libérer ou non sur parole, ou dans un algorithme utilisé par les services de la protection de l'enfance d'un comté de Pennsylvanie. « *Il est important de ne pas oublier d'autres domaines d'application, plus discrets, où les algorithmes sont déjà présents : banques, assurances, allocations, emploi…* », avertit Philippe Besse, professeur émérite au département de mathématique et modélisation de l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Toulouse. Début 2017, Amazon a abandonné un projet d'algorithme de recrutement car celui-ci ne cessait de privilégier les hommes aux postes techniques.

En cause, la base de données sur laquelle est bâti l'algorithme

D'où des initiatives comme le *bias bounty* de l'automne 2022. L'université californienne Stanford a également lancé une compétition sur ce thème. Les candidats doivent proposer des outils permettant d'auditer un système d'IA pour dire si elle est génératrice de discriminations. Le problème peut résider dans l'algorithme même, mais le plus souvent, il faut chercher du côté des bases de données ayant servi à l'entraîner. « *Pour bâtir des IA traitant du langage, on utilise des textes écrits par des humains, issus d'une certaine culture, avec un certain point de vue,* explique Jean-Paul Delahaye, du Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille. *En matière d'image, le biais sera lié aux choix des images avec lesquelles on organise l'apprentissage, pas forcément à l'image elle-même.* » Certains outils de reconnaissance faciale étudiés par Joy Buolamwini étaient entraînés sur une base comptant 77,5 % de visages masculins, blancs à 83,5 %.

La solution ? Ajouter ou retirer des don-

nées, selon les cas de figure. En 2017, le constructeur automobile Volvo est ainsi allé filmer en Australie des kangourous car les systèmes de détection visuelle de ses voitures autonomes n'avaient pas été entraînés sur cet animal. « *Une autre technique consiste à altérer le signal d'erreur qui sert à l'apprentissage [indication reçue par l'algorithme qu'il se trompe dans sa prédiction] en l'augmentant lorsqu'il lèse à tort une catégorie,* ajoute Jean-Louis Dessalles. *Cela change les décisions apprises, mais cela implique de repérer le biais pendant l'apprentissage.* »
Dans certaines situations, on élimine des données les critères conduisant à des discriminations, comme le genre des candidats à l'embauche sur des CV ou dans des dossiers de demande de financement. « *Mais ces algorithmes sont d'excellents prédicteurs,* prévient Jean-Louis Dessalles. *Si on supprime des attributs pertinents, leur stratégie sera de les remplacer par d'autres qui sont corrélés.* »
Ayant par exemple appris sur une base de données que les hommes sont plus amateurs de football que les femmes, un algorithme déjà biaisé en faveur des hommes favorisera les amateurs de ballon rond quand l'information apparaîtra. Le problème étant qu'il est impossible de savoir à l'avance à quelles corrélations de substitution il va procéder. Et à trop supprimer d'attributs conduisant à des biais, on finit par dégrader la qualité globale de la décision de l'algorithme.
Quoi qu'il en soit, corriger un biais affectant un groupe provoque une précision moindre en moyenne. Si on parvient à éliminer une discrimination touchant tel groupe de personnes dans un algorithme de recrutement, une autre catégorie de profils, qui n'a rien à voir, va soudain être injustement jugée inapte pour le poste, alors que l'algorithme prenait la décision inverse avant sa correction. « *Il y a un conflit entre l'équité entre groupes et l'équité moyenne pour les individus* », résume Jean-Louis Dessalles.

Les données comportent toujours des biais

Une démarche plus radicale consiste alors à refaire complètement l'apprentissage de l'algorithme, à partir d'autres données. Trois chercheuses des universités Carnegie Mellon et A&M du Texas (États-Unis) ont fait le test avec un outil de police prédictive. Ces algorithmes, dont PredPol est le plus connu, identifient les zones où envoyer en priorité des patrouilles de police (*hot spots*), en fonction d'un historique de données sur les interventions policières, les arrestations ou des crimes et délits. Or, il a été vite constaté, notamment aux États-Unis, qu'ils surciblaient à tort les quartiers défavorisés et peuplés de minorités.
Les chercheuses ont travaillé sur la ville de Bogata (Texas). Elles ont bâti un outil de prédiction de type PredPol entraîné sur les résultats d'un sondage bisannuel de la chambre de commerce. Il recense les crimes et délits signalés par des victimes et le fait qu'elles ont déposé plainte ou non. L'étude montre que les victimes, qu'elles soient blanches ou noires, ont tendance à plus signaler un crime commis par un Noir ; et que les personnes aisées ne signalent pas les mêmes méfaits que les plus défavorisés, car elles n'ont pas la même perception de leur gravité. Dans d'autres cas, la méfiance envers les forces de police dissuade les gens de porter plainte. Avec pour résultat de surévaluer les *hot spots* dans certains quartiers et de les sous-estimer dans d'autres. Changer de données d'apprentissage s'est donc traduit malgré tout par des biais.
Toutes ces limites n'invalident pas les efforts déployés pour endiguer le problème, et la prise de conscience est réelle. Des outils sont même développés pour débusquer automatiquement les biais. Mais ceux-ci restent néanmoins inévitables. La vraie question porte sur leur acceptabilité. Des villes américaines ont cessé par exemple de recourir à PredPol. Ce n'est pas la même chose de « subir » des recommandations biaisées de films sur Netflix ou un refus de remise de peine basé sur la couleur de peau. ■ **Arnaud Devillard** @A_Devila

TÉLÉCOM PARIS

« S'il existe un biais sexiste dans les données d'apprentissage, les intelligences artificielles vont le reproduire »

Jean-Louis Dessalles, maître de conférences à Télécom Paris, membre du Laboratoire de traitement et communication de l'information

APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

Des générateurs de stéréotypes

Le Diffusion Bias Explorer est une interface mise en ligne par The Hugging Face, société américaine spécialisée en apprentissage automatique. Associée à un chercheur de l'université de Leipzig (Allemagne), l'équipe a utilisé trois outils de génération d'images à partir de textes : Dall-E 2 et deux versions de Stable Diffusion. Ils ont produit 96 540 visuels répartis en deux corpus : l'un combine 150 professions et 20 adjectifs, l'autre associe trois genres (homme, femme, non-binaire) et une communauté (afro-américaine, latino-américaine, amérindienne, blanche…). Explorer les résultats est un voyage dans les stéréotypes : les Amérindiens portent forcément des coiffes à plumes, les conducteurs de bus sont noirs, les adjectifs « bienveillant » ou « émotif » privilégient les images de femmes, mais pas quand ils sont associés à « expert en informatique » ou « P-DG ». *(Lire aussi sciav.fr/915IA)*

THALES ALENIA SPACE

Long de 140 m pour 32 m de diamètre, le Stratobus de Thales Alenia Space, gonflé à l'hélium, pourra effectuer des missions de longue durée.

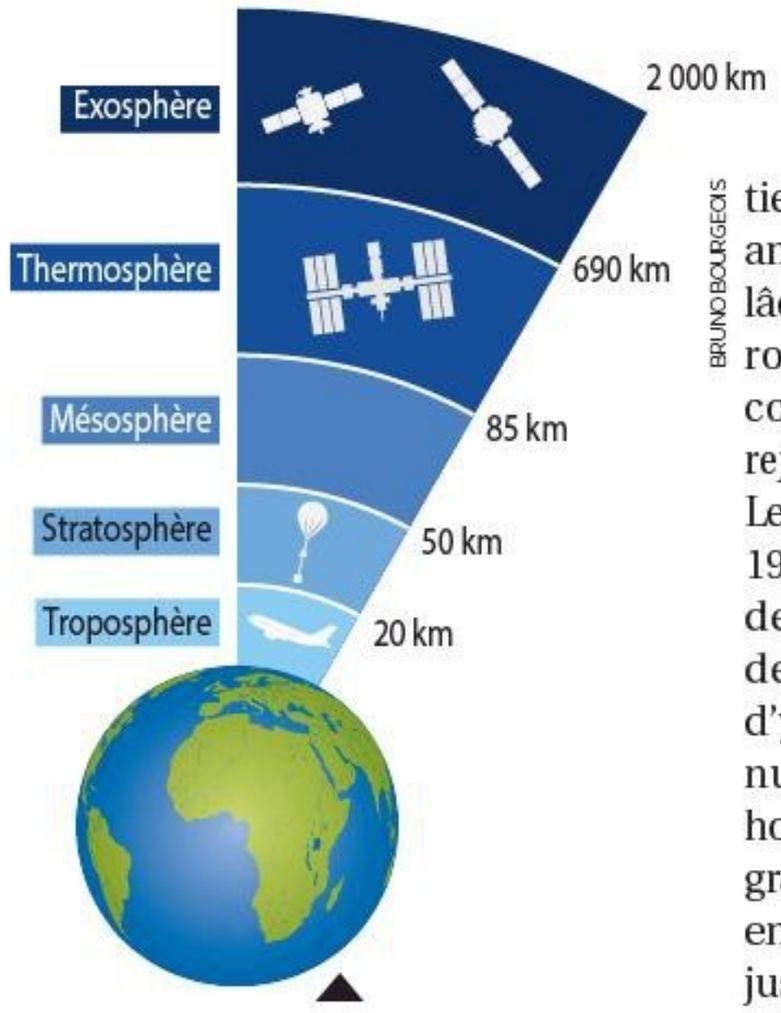
Les ballons à la conquête de la stratosphère

L'épisode récent du ballon chinois qui a survolé l'Amérique du Nord témoigne du retour d'une stratégie d'espionnage singulière très prisée durant la guerre froide. Français, Allemands ou Italiens développent des projets de dirigeables évoluant à 20 km d'altitude, hors des espaces aériens nationaux.

Entre la couche basse de l'atmosphère, de plus en plus saturée par le trafic aérien, et les orbites terrestres, menacées d'encombrement par les méga-constellations de satellites, s'étend un espace quasi vierge : la stratosphère, qui attire aujourd'hui les convoitises des industriels, mais aussi des gouvernements et des militaires. En atteste le récent épisode du ballon chinois qui a déclenché une crise diplomatique entre Washington et Pékin. Repéré — officiellement — le 28 janvier au-dessus de l'Alaska, le ballon a ensuite survolé le territoire canadien et les États-Unis, avant d'être abattu en mer le 4 février au large de la Caroline du Sud, de manière que sa chute n'entraîne aucun dégât sur les zones habitées. Les images réalisées par des avions militaires montrent un ballon d'environ ▶

60 mètres de haut, équipé d'antennes probablement destinées à géolocaliser et intercepter des communications sensibles. Ses larges panneaux solaires étaient en mesure d'alimenter de multiples capteurs et instruments. Selon les dernières déclarations de responsables américains, le ballon chinois aurait été en réalité suivi dès son lancement depuis la province de Hainan, au sud de la Chine. Les États-Unis ont accusé les Chinois de mener une campagne d'espionnage mondial visant une quarantaine de pays d'Amérique, d'Asie — notamment le Japon, l'Inde, le Vietnam, Taïwan et les Philippines — et d'Europe.

Si l'empire du Milieu a pu mener impunément cette mission, c'est parce qu'elle a été déployée dans un espace international. La limite des espaces aériens nationaux est en effet instaurée à 12 milles marins (22 km) au-dessus du niveau de la mer, selon le standard défini par le droit de la mer… Soit au sein de la stratosphère qui se situe, aux latitudes moyennes, de 10 à 50 km au-dessus du sol, selon l'organisation météorologique mondiale. *« À 20 km d'altitude, les engins bénéficient encore d'une portance, d'une bonne visibilité et d'un faible temps de latence »*, souligne Yannick Combet, directeur du projet Stratobus chez Thales Alenia Space. Ce qui



BRUNO BOURGEOIS

Les ballons stratosphériques évoluent dans la deuxième couche de l'atmosphère, où la densité de l'air est trop faible pour permettre le vol des avions.

permet d'acquérir une précision de renseignement, de surveillance et de reconnaissance inaccessible aux satellites postés à plusieurs centaines de kilomètres du sol. Et des temps de communication réduits.

Une technologie abandonnée à la fin des années 1950

L'utilisation de ballons espions découle de la découverte, au début du XXe siècle, de vents de haute altitude (les courants-jets ou *jet-streams*) qui méandrent essentiellement d'ouest en est. Les stratèges américains en déduisirent qu'un ballon lâché dans la stratosphère depuis l'Europe occidentale serait porté par ces courants au-dessus de l'URSS avant de rejoindre les bases américaines au Japon. Le programme secret Mogul, démarré en 1947, avait ainsi lancé deux ans durant des ballons-sondes par grappes au-dessus du territoire soviétique, afin d'y surveiller notamment les activités nucléaires. En 1956, le président Eisenhower réitérait l'expérience avec le programme Genetrix, qui lâcha 516 ballons en vue de survoler tout le bloc de l'Est jusqu'à la Chine communiste. Ironie de l'histoire : les Soviétiques découvrirent vite que les ballons perdaient de l'altitude la nuit et entraient alors dans l'espace aérien, où ils devenaient une cible pour les avions de chasse. C'est ainsi qu'environ 90 % de ces ballons ont été abattus ou accidentellement perdus. Sur les 54 récupérés, seuls 31 ont permis de recueillir des informations, qui couvraient tout de même une surface de 2,5 millions de kilomètres carrés.

Cette technologie fut abandonnée par les Américains à la fin des années 1950, remplacée d'abord par les avions espions Lockheed-Martin U-2, capables de voler à 21 km d'altitude, puis par les satellites. Si ceux-ci assurent aujourd'hui l'essentiel des missions de défense, il existe un

IWAYA GIKEN

La capsule conçue par le Japonais Keisuke Iwaya.

DÉVELOPPEMENT

Le tourisme aussi devient stratosphérique

L'ingénieur japonais Keisuke Iwaya a dévoilé en février une capsule de 1,5 mètre de diamètre conçue pour emporter deux personnes jusqu'à 25 km à l'aide d'un ballon empli d'hélium. Depuis cette altitude, les passagers pourront admirer la courbure de la planète avant de se reposer sur l'île de Hokkaido. Un premier vol habité est prévu cette année. Prix du billet : 24 millions de yens (165 000 euros). D'autres projets de tourisme stratosphérique fleurissent autour du globe. En France, les start-up Stratoflight et Expleo développent une capsule avec balcon pour six personnes, hissée à 35 km par ballon à hydrogène et redescendant sous voile. Même capacité d'emport pour la cabine de la société Zephalto, sous ballon à enveloppe réutilisable. Ce système a également des ambitions scientifiques de prélèvement de données atmosphériques et d'observations spatiales et terrestres.

EYEPRESS NEWS/SHUTTERSTOCK/SIPA

Suspecté d'espionnage, le ballon chinois qui a survolé les territoires canadien et américain a été abattu le 4 février par un avion de chasse de l'US Army, puis ses débris récupérés au large des côtes de la Caroline du Sud (États-Unis).

regain d'intérêt pour les aérostats. La Commission européenne a ainsi alloué, le 9 mars, une enveloppe de 43 millions d'euros au programme EuroHAPS (European High Altitude Pseudo-Satellites), consacrée au développement de démonstrateurs de vol. Le concept le plus ambitieux est porté par l'entreprise franco-italienne Thales Alenia Space. Stratobus est *« un dirigeable de 140 mètres de long pour 32 mètres de diamètre, semblable à ceux des années 1930 mais gonflé à l'hélium,* détaille Yannick Combet. *Il évoluera dans la stratosphère pour des missions de longue durée avec une charge utile de 250 kg ».*

Pour maintenir son assiette de vol au-dessus d'un théâtre sensible, Stratobus disposera de quatre moteurs électriques alimentés par plus de 1 000 m² de cellules solaires à bas prix et haut rendement. *« Cette gestion autonome de l'énergie, qui doit permettre de maintenir le cap du dirigeable en fonction des vents, est l'un des nombreux défis à résoudre,* explique Yannick Combet. *Il nous faut aussi développer une enveloppe légère et robuste, ainsi que des instruments d'avionique capables de fonctionner en basses pression et température pendant un an. Un Stratobus posté au-dessus de la frontière russo-ukrainienne un an avant le déclenchement des hostilités aurait permis de surveiller, sur une zone de 500 km, les mouvements de troupe et la mise en place de systèmes offensifs avant qu'ils soient dissimulés. »* Deux démonstrateurs de 60 m de long lâchés depuis l'île de Fuerteventura, dans l'archipel des Canaries (Espagne), permettront de tester en 2024 et 2026 ces nouvelles technologies.

BRUNO LEVY

« Moins coûteux, moins polluants, ces systèmes sont une solution pour accompagner le développement de l'Internet des objets »

Xavier Pasco, directeur de la Fondation pour la recherche stratégique et spécialiste de l'espace

Les deux autres projets financés par la Commission européenne sont italien et allemand. Le projet transalpin HHAA (Hybrid High Altitude Airship) est un dirigeable hybride qui utilise un profil d'aile pour optimiser sa portance. Gonflé à l'hélium, il atteint sa forme optimale à l'altitude de 10 à 12 km et rejoint ensuite, à l'aide de ses moteurs, son poste à 20 km, où il doit se maintenir entre un à quatre mois. Sa charge utile de 25 à 100 kg permettrait, par exemple, l'écoute des signaux électroniques émis par le sol ou les avions, mais aussi la surveillance des côtes et de l'environnement, la gestion de crises et l'agriculture de précision. Enfin, Asbas (Autonomous Stratospheric Balloon System), le concept d'outre-Rhin, est composé d'une série de trois ballons d'hélium destinés à effectuer une trajectoire balistique au-dessus d'une zone d'intérêt stratégique. La charge utile redescend ensuite sous parachute. C'est un système furtif qui peut être rapidement déployé et récupéré.

Un moyen d'étudier l'évolution de l'atmosphère

Outre des missions de défense, ces systèmes pourraient avoir des applications environnementales — pour la surveillance des feux de forêts et des populations animales, par exemple — et scientifiques, l'évolution de l'atmosphère dans le contexte du changement global étant une donnée essentielle des modèles climatiques. Le marché des télécommunications est également intéressé. *« Moins coûteux, plus faciles à déployer et moins polluants que les satellites, ces systèmes polyvalents sont une solution pour accompagner le développement de l'Internet des objets et des voitures autonomes,* analyse Xavier Pasco, directeur de la Fondation pour la recherche stratégique. *Ces nouvelles technologies, qui réclament toujours plus de données en temps réel, nécessitent de multiplier les infrastructures de communication. »* Le temps de la conquête stratosphérique semble avoir sonné. ■

Sylvie Rouat @srouat1

TERENCE TAO
MATHÉMATICIEN

L'oracle de Californie

Terence Tao vient d'être distingué par l'Académie des sciences, à Paris. Une médaille de plus pour ce mathématicien hors norme qui collectionne les récompenses. L'étendue de ses connaissances et sa rapidité de travail font l'admiration de ses contemporains.

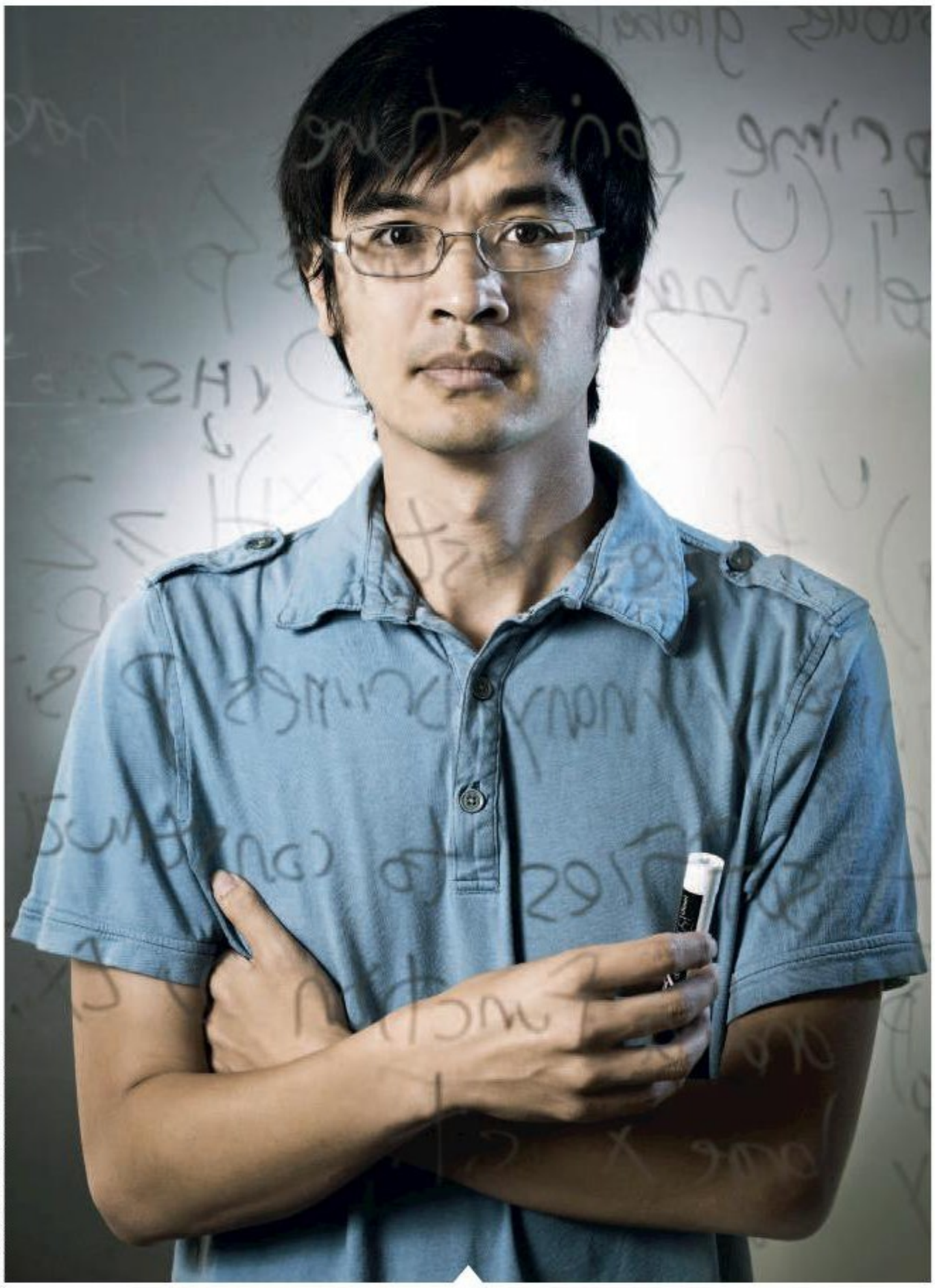
Quand celui qui est considéré comme le plus grand mathématicien vivant est de passage à Paris pour recevoir la Grande Médaille de l'Académie des sciences, en cette fin mars, l'occasion était trop belle de rencontrer Terence Tao. Star incontestée de la discipline, ce professeur à l'université de Californie à Los Angeles (UCLA, États-Unis) a reçu tellement de récompenses — dont la médaille Fields — qu'on pourrait le croire blasé. Lors de la séance de réception à l'académie, Terry — qu'il préfère à son prénom officiel — a pourtant l'air d'apprécier ce moment, et va même le lendemain donner une conférence pour des mathématiciens puis rencontrer des lycéens au Bourget. À 47 ans, si celui qui fut un enfant prodige n'a plus rien à prouver, qu'est-ce qui le pousse encore à faire des mathématiques ? « *D'abord cela m'amuse toujours,* dit-il, *mais aussi parce que je dispose d'une grande liberté. En fait, ce que j'apprécie le plus, c'est de trouver des connexions entre les différents champs des mathématiques.* » Spécialiste de l'analyse, il connaît en profondeur une multitude d'autres domaines, s'attaquant aux équations aux dérivées partielles, à la théorie analytique des nombres ou encore à l'analyse harmonique et aux probabilités. Un éclectisme qui fait l'admiration de ses contemporains et le hisse au rang de mathématicien quasi universel.

BIO EXPRESS

- **17 juillet 1975** Naissance à Adélaïde (Australie).
- **1986-1987-1988** Participe aux Olympiades internationales de mathématiques (le plus jeune participant), gagnant une médaille de bronze, d'argent et d'or.
- **1991** Master de mathématiques à l'université Flinders d'Adélaïde.
- **1992** Étudiant en thèse à l'université de Princeton, États-Unis, à l'âge de 16 ans.
- **1996** Soutient sa thèse sous la direction de Elias Stein.
- **1996** Obtient un premier poste à l'université de Californie à Los Angeles (UCLA), États-Unis.
- **2000** Professeur à UCLA.
- **2006** Médaille Fields.
- **2012** Prix Crafoord.
- **2015** Breakthrough Prize in Mathematics.
- **2023** Grande Médaille de l'Académie des sciences.

Il incarne l'esprit de la Renaissance

Au jeu des comparaisons, les noms fusent : « *On entend beaucoup que c'est le Mozart des maths, mais il me fait plutôt penser à Léonard de Vinci,* confie Emmanuel Candès, professeur à l'université Stanford (États-Unis), avec lequel il a collaboré sur des problèmes de traitement du signal. *Avec lui, on revient à cet esprit de la Renaissance, où par une sorte de miracle, il y a un cerveau humain, le sien, qui est capable d'appréhender un*



HUGH HAMILTON/ HEADPRESS/STARFACE

À 47 ans, le mathématicien multiplie les distinctions pour ses travaux innovants et a rédigé plus de 300 articles dans sa discipline.

immense champ de la connaissance. » « *C'est une sorte de génie des mathématiques comme il y en a eu rarement, le Leonhard Euler du XXIe siècle* », renchérit Emmanuel Breuillard, un de ses collaborateurs sur la combinatoire additive dans les groupes, professeur à l'université d'Oxford (Royaume-Uni).

Terry Tao s'amuse de ces comparaisons : « *Je pense surtout que la manière dont nous travaillons aujourd'hui diffère grandement. Même au cours de ma carrière, les choses ont changé. Lorsque j'étais étudiant, s'il y avait un domaine des mathématiques que vous vouliez apprendre, vous aviez peu de choix : soit aller voir un professeur qui connaissait le sujet, ou bien trouver à la bibliothèque le livre idoine et le lire. Aujourd'hui, je peux consulter Wikipédia, j'ai des collègues à qui m'adresser, et je peux même demander à ChatGPT de m'expliquer le sujet. Nous avons la chance d'avoir accès à tous ces outils.* »

L'étendue de ses connaissances mathématiques et sa rapidité de travail lui confèrent une place à part. Avec Emmanuel Candès, il a publié plusieurs résultats sur l'acquisition comprimée, un domaine qui a révolutionné le traitement du signal, ce dont il est particulièrement fier. « *C'est sans doute le seul travail que j'ai fait qui ait eu un impact significatif : les IRM incluent aujourd'hui les algorithmes que nous avons mis au point et qui permettent d'accélérer l'acquisition de données, et donc le temps passé dans la machine* », confie Terry Tao. Avec Ben Green, professeur à l'université d'Oxford, il démontre que la séquence des nombres premiers contient des progressions arithmétiques arbitrairement longues (théorème de Green-Tao).

Il change régulièrement de domaine de recherche

Ses apports dans le domaine de l'analyse harmonique, des équations aux dérivées partielles ou encore sur les matrices aléatoires ne sont pas en reste. Il a écrit plus de 300 articles de mathématiques, la plupart en collaboration. Spécialiste des matrices aléatoires, Alice Guionnet, directrice de recherche CNRS à l'École normale supérieure de Lyon, avoue être rassurée « *que Terry ait quitté le domaine des matrices aléatoires, car il a déjà eu de beaux résultats et j'avais un peu peur de ce qu'il aurait pu trouver en y restant…* »

Terry Tao s'esclaffe à cette évocation. Et s'il est vrai qu'il donne l'impression de papillonner, c'est toujours avec une insatiable envie d'apprendre de nouvelles mathématiques et avec ce fil rouge d'établir des connexions. « *En collaborant avec différents mathématiciens et mathématiciennes, je suis devenu plus familier avec leur langue, et j'ai acquis les outils correspondants* », raconte-t-il. Avec le temps, sa boîte à outils est devenue tellement vaste qu'il est capable ▶

de converser avec les spécialistes de presque tous les domaines. « *Certains se demandent comment j'ai pu avoir telle idée pour résoudre tel ou tel problème, mais c'est simplement que je connaissais cette idée — standard dans ce domaine — et que je l'ai appliquée à un autre domaine. Une fois que l'idée s'est imposée et que d'autres ont commencé à la développer, je suis heureux de laisser ceux-ci s'en emparer pour passer à autre chose. Ainsi, régulièrement, je change de domaine et je ne sais pas sur quoi je travaillerai l'année prochaine, au gré des rencontres avec de nouveaux collaborateurs…* », explique Terry Tao.

Une organisation qui laisse de la place au hasard

Malgré ses multiples occupations, il reste à la portée de tous et d'une efficacité redoutable. « *Alors que la moitié de la planète doit lui écrire, quand j'envoie un mail à un groupe de gens dont il fait partie pour organiser quelque chose, il est toujours le premier à répondre* », admire Julia Wolf, professeure à l'université de Cambridg (Royaume-Uni). Comment fait-il pour être aussi efficace ? « *Je vois mon avenir proche un peu comme le jeu Tetris, où il s'agit de compléter des lignes avec des blocs de différentes formes : les tâches que j'ai à faire sont comme des blocs qui arrivent. Si j'ai quinze minutes, je peux faire ce courriel, si j'ai deux heures, je peux terminer ce papier que je voulais écrire. Dès qu'il y a un trou, j'essaye de le combler. Mais comme avec Tétris, on finit par perdre et je n'arrive pas à faire tout ce que je voulais…* »

Malgré ses sollicitations et activités débordantes, il parvient à enseigner et à faire encore toutes sortes de tâches administratives. « *Le département de mathématiques d'UCLA est très accueillant et c'est en bonne partie grâce à l'ambiance agréable qu'il y fait régner, car il n'a pas un* ego *démesuré et aucune tâche n'est trop petite, aucun comité n'est trop insignifiant pour lui : tout est très collégial* », insiste Monica Visan, professeure à Ucla et qui fut son étudiante en thèse.

Cette organisation sans faille laisse pourtant de la place à la sérendipité, ces choses qui surviennent par hasard. « *Quand je prévois de sauter le déjeuner pour finir un article et qu'un collègue me présente un visiteur de passage, j'abandonne mon planning soigneusement construit et la discussion au déjeuner est souvent fructueuse et peut mener à de nouvelles collaborations. Comme ce matin, avant cette interview j'avais prévu de travailler, mais Étienne Ghys* [secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences] *voulait m'emmener voir des documents rares aux archives de l'académie. Pour être poli, j'ai accepté et j'ai pu lire la lettre qu'Évariste Galois avait écrite la veille de sa mort, causée par un duel en mai 1832. Je ne m'y attendais pas, et voir cette lettre où il jette les fondements de la théorie qu'on allait appeler théorie de Galois était émouvant et passionnant. Je vais sans doute faire un texte de blog à ce propos* », narre Terry Tao. Avoir des règles et savoir les abandonner, c'est peut-être là un secret de la réussite. ■ **Philippe Pajot** @ philpaj

« Je vois mon avenir proche un peu comme le jeu Tetris, où il s'agit de compléter des lignes avec des blocs de différentes formes » **Terence Tao**

TRANSMISSION

Un blog pour se « nettoyer l'esprit »

Terence Tao ne fait pas que publier dans de grandes revues mathématiques : il transmet aussi ses idées dans un blog*, créé en 2007, qui est une référence pour les étudiants, mais aussi pour les chercheurs. « *Ce blog qu'il alimente sans discontinuer depuis plus de quinze ans est un trésor, en particulier pour les jeunes mathématiciens. Il traite également des domaines mathématiques qu'il vient d'apprendre et qu'il veut transmettre* », indique Julia Wolf, professeure à l'université de Cambridge (Royaume-Uni). Il participe d'une volonté de partager et aussi de vider son cerveau « *La motivation première de mon blog était de mettre par écrit mes idées pour me nettoyer l'esprit et pouvoir passer à autre chose. Au début de ma carrière, chaque fois que j'avais un étudiant en thèse, je lui donnais des conseils sur la rédaction, sur la résolution de problème, etc. Et j'avais l'impression de me répéter. J'ai donc ajouté une page de conseils de carrière sur mon blog. Par ailleurs, en me rendant compte que les gens consultaient régulièrement mes pages Web pour voir ce que je faisais, j'ai organisé mes travaux sur ce blog en y ajoutant leurs commentaires, ce qui rend les choses plus interactives et tout le monde peut en tirer profit.* »

De fait, ce blog est devenu un lieu sur la toile qui fédère les collaborations. « *Je connais un mathématicien qui a fait sa thèse presque entièrement grâce au blog de Terry et les commentaires échangés* », assure Emmanuel Breuillard, professeur à l'université d'Oxford (Royaume-Uni).

* https://terrytao.wordpress.com

RIVAGES DU MONDE

Voguer. Échanger. Rêver

En été 2023, nos croisières Grand Nord :

Spitzberg, Groenland, Islande, Ecosse

NOS ATOUTS

Départs de Paris • Francophone
À bord du World Explorer, un yacht d'expédition haut de gamme de 180 passagers

Découvrir ces croisières ▶

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01.83.79.94.67 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – DockProd

Énergie

Les solutions pour produire chez soi

Pour sortir de la dépendance aux énergies fossiles, les pouvoirs publics incitent désormais les particuliers à électrifier un certain nombre d'usages. Photovoltaïque, éolien, géothermie, microhydraulique, « low-tech »... Voici les solutions technologiques qui permettent de produire son énergie soi-même.

Dossier réalisé par
Loïc Chauveau et Rachel Mulot

SOMMAIRE

ENJEUX Vers des citoyens producteurs d'énergie renouvelable p. 48 **PHOTOVOLTAÏQUE** Bien négocier son virage solaire p. 50
ÉOLIEN À la recherche d'un nouveau souffle. p. 53 **MICROHYDRAULIQUE** Ne pas se retrouver à sec p. 55
GÉOTHERMIE Utiliser la chaleur du sol pour se chauffer. p. 56 **LOW-TECH** Vivre mieux avec moins p. 58
ENTRETIEN Hervé Lextrait, directeur du pôle transition énergétique d'Enedis p. 60

RICHARD NEWSTEAD/ GETTY IMAGES

Vers des citoyens producteurs d'énergie renouvelable

Sobriété, autonomie, production pour l'autoconsommation ou mise en réseau : la « révolution électrique » va transformer des consommateurs passifs en acteurs de l'énergie.

En 2007, *Sciences et Avenir* lançait une grande enquête : comment produire son énergie soi-même, de façon autonome ou en se raccordant au réseau. Les citoyens rêvaient de « renouvelables » à leur domicile, tandis que les scientifiques et ingénieurs évaluaient les promesses et écueils de cette décentralisation. Seize ans plus tard, la situation a évolué de façon très différente selon les filières. Le solaire, de plus en plus rentable et aidé, se déploie désormais largement chez les particuliers *(lire p. 50)* ; le gisement de la géothermie *(p. 56)* a la possibilité de gagner en terrain et profondeur. Le petit éolien *(p. 53)*, en revanche, essuie des vents contraires et ne bénéficie plus de crédits d'impôt, malgré une efficacité accrue. Les partisans des microcentrales hydrauliques sont engloutis sous les contraintes administratives et techniques, sauf en région Bourgogne Franche-Comté *(p. 55)*. La démarche *low-tech (p. 58)*, en revanche, irrigue désormais toutes les couches de la société, donnant la priorité à la réduction de la consommation d'énergie, à l'autonomie, à l'autoproduction adaptée aux besoins essentiels de chacun.

Au-delà des économies et de l'indépendance que chacun peut y gagner, les enjeux sont de taille. En 2021, 63 % du mix énergétique français en énergie finale — c'est-à-dire l'énergie réellement consommée après les transformations, le transport et la distribution qui engendrent souvent des pertes — est d'origine fossile, contre 19 % seulement d'origine renouvelable. Cette dépendance vis-à-vis du pétrole ou du gaz, extraits à grands frais, a de lourds impacts environnementaux : pollutions atmosphériques, océaniques, et changement climatique. La France a inscrit l'objectif de neutralité carbone dans sa loi énergie et climat du 8 novembre 2019. À l'horizon 2030, la feuille de route de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) identifie la réduction de la consommation d'énergie carbonée et ses émissions, y compris à l'échelle individuelle, comme principal levier d'action pour mener à bien la transition énergétique.

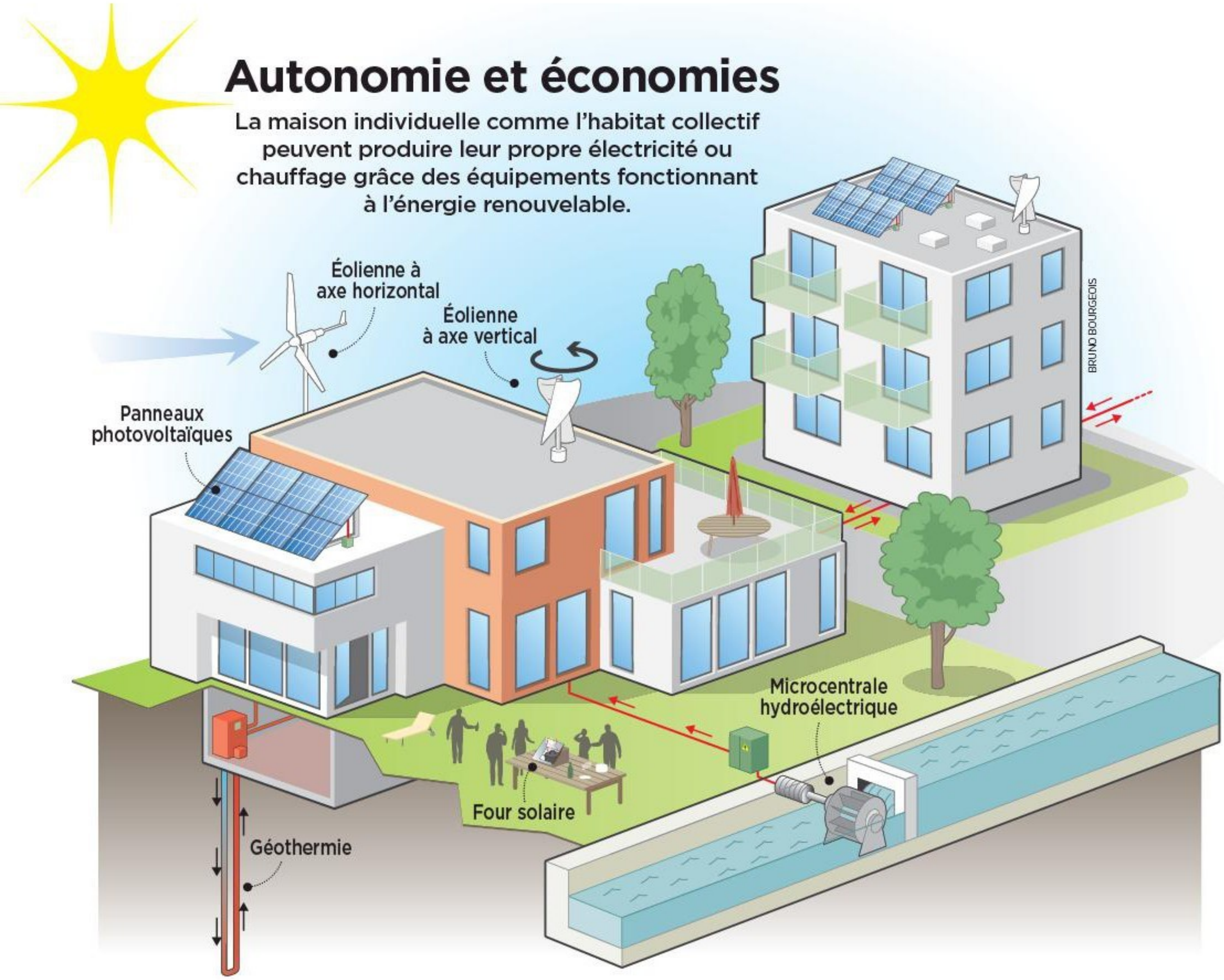
> La révolution annoncée depuis une dizaine d'années se concrétise, imposant d'électrifier des usages qui dépendent aujourd'hui des énergies fossiles

La révolution annoncée depuis une dizaine d'années se concrétise, imposant d'électrifier un certain nombre d'usages qui dépendent aujourd'hui des énergies fossiles. Les particuliers sont concernés au premier chef par leur voiture et leur chauffage. Or, cette augmentation de la part de l'électricité ne s'opère pas selon le schéma qui prévaut depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, avec la création de grands opérateurs régionaux ou nationaux (comme EDF pour la France) et de grosses centrales distribuant par un réseau de haute, moyenne et basse tensions les électrons jusqu'au consommateur final. On assiste au processus inverse. Grâce au photovoltaïque et à l'éolien (celui des parcs surtout) en premier lieu, la production est désormais ascendante. Elle part d'une multitude de points locaux pour former un réseau en toile d'araignée qui mutualise ces sources multiples.

RTE et Enedis se préparent de longue date à cette révolution *(lire p. 60)*. Longtemps critiqué, le compteur Linky, aujourd'hui présent dans plus de 90 % des foyers, constitue la brique essentielle de ce nouveau schéma. Il permet en effet de gérer la production des panneaux solaires, de la faire coïncider avec les besoins du ménage et d'adapter les fournitures d'énergie vers le réseau. Cette

Autonomie et économies

La maison individuelle comme l'habitat collectif peuvent produire leur propre électricité ou chauffage grâce des équipements fonctionnant à l'énergie renouvelable.



production décentralisée croissante implique une deuxième étape : celle du stockage. Les batteries des voitures électriques, les cumulus d'eau chaude seront autant de points de réserve des électrons en excès lors des journées très ensoleillées et les jours de grand vent. Les électriciens de l'Europe entière (RTE et Enedis en France) ont déjà intégré ce schéma en construisant une gestion commune d'un réseau européen, qui ira chercher l'énergie là où souffle le vent et où le soleil brille pour lisser et distribuer les excès.

Cette nouvelle architecture implique davantage le consommateur, qui devient acteur : la « révolution électrique » actuelle oblige l'individu à s'intéresser au mode de production, aux coûts et, *in fine*, à une réflexion sur l'usage de l'énergie. La sobriété découle de la prise de conscience que produire de l'énergie implique des impacts divers sur le climat et la biodiversité.

L'autoconsommation devrait devenir le schéma dominant des prochaines décennies

À écouter les professionnels d'Enedis et de RTE, l'autoconsommation devrait devenir le schéma dominant des prochaines décennies. Des coopératives d'un nouveau genre vont mailler le territoire et conduire à des relations de voisinage différentes. Reconnu et aidé par l'État, le mouvement des « territoires à énergie positive » rassemble les efforts des collectivités et leur donne un cadre d'aménagement et de développement qui concerne autant les grandes villes que les territoires ruraux. 156 territoires sont ainsi actuellement engagés dans un objectif « zéro carbone » en 2050. ■

L. C. et R. M.

PHOTOVOLTAÏQUE

Bien négocier son virage solaire

Les pouvoirs publics simplifient les démarches administratives pour installer des panneaux solaires en autoconsommation.

2800 € Coût d'une installation de 1 kilowatt-crête (6 m² de panneaux)	**8500 à 10 000 €** Prix indicatif pour une maison de 120 m²	**8 ans** Retour sur investissement	**25 ans** Durée de vie garantie des panneaux

Ça y est, l'installation de panneaux solaires en France décolle enfin. En 2022, pour la première fois, le seuil de deux nouveaux gigawatts (GW) a été franchi. Jusque-là, notre pays était un très mauvais élève au sein de la classe du solaire, et la puissance installée ne dépasse toujours pas les 15 gigawatts (GW) — alors que l'objectif de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) était de 20 GW pour 2023. Entre 2012 et 2019, le rythme annuel de croissance a été de 0,9 GW. Environ 450 000 particuliers ont équipé leurs toits, soit 4 % des logements à bon potentiel de production. C'est la 12e place en Europe. Pour atteindre l'objectif de 40 GW prévu dans la PPE 2023-2028, il faudrait désormais installer 4 GW par an. La loi d'accélération des énergies renouvelables que vient d'adopter le Parlement a effacé des obstacles administratifs, juridiques et réglementaires et va permettre de changer de rythme. Cette loi impose également d'équiper d'ombrières les parkings de plus de 1 500 m² et les toits des bâtiments d'une surface de plus de 500 m², soit une grande part des immeubles d'habitation, de bureaux et de PME.

« *L'installation de panneaux solaires coûte 10 000 euros en moyenne par foyer et le retour sur investissement entre huit et dix ans était jusqu'ici dissuasif,* note Arthur Jouannic, directeur du cabinet français LCP Delta, spécialisé dans la transition énergétique. *Mais les brusques hausses du prix de l'électricité constatées en 2022 changent la donne.* » Une énergie de proximité dont le coût ne dépend pas de contingences lointaines et incontrôlables devient attirante. Ainsi, la gestion de l'autoconsommation est-elle le principal poste d'investissements prévus par le distributeur d'électricité Enedis qui doit s'adapter à ces modifications profondes dans la façon de consommer le « courant » *(lire l'entretien p. 60)*. « *Avec la loi d'accélération des énergies renouvelables adoptée au Parlement en mars, ce contexte énergétique fait exploser la demande* », se réjouit Alexandre Roesch, délégué général du Syndicat des énergies renouvelables (SER). Les études de marché de LCP Delta prévoient une croissance de 11 % par an de toitures équipées d'ici à 2030, soit 1 586 000 logements équipés. Voici les règles à suivre pour bien réussir son virage énergétique.

Une bonne installation doit viser 100 % d'autoconsommation

Jusqu'en 2018, la règle était celle de la vente totale de l'électricité produite par ses panneaux solaires. Le tarif était fixe et garanti dans le temps. Mais l'investissement de départ (autour de 10 000 euros) était élevé, et les aides trop peu importantes pour assurer un retour sur investissement avant huit ans. Les panneaux photovoltaïques ont certes une durée de vie de quarante ans et ils effacent le bilan carbone de leur construction (même provenant de Chine) en trois ans seulement, mais ces arguments n'ont convaincu que les citoyens les plus motivés.

Aujourd'hui, tout a changé : la totalité des contrats de production signés se font désormais sur la base de l'autoconsommation. « *C'est une vraie logique que de consommer soi-même son électricité plutôt que de la vendre,* assure Alexandre Roesch. *D'autant que les compteurs Linky permettent de bien faire la part entre ce qui vient du toit et ce qui est apporté par le réseau.* » Des chiffres à la lecture desquels il faut néanmoins être initié car deux notions sont parfois confondues. Il y a d'abord le taux d'autoconsommation : c'est la part de la production qui est directement consommée dans la maison, le surplus étant vendu au réseau. Une bonne installation doit viser les 100 %. Le second chiffre important est le taux de couverture. Une installation type de 1 kilowatt-crête (kWc, puissance maximale dans les meilleures conditions d'ensoleillement), qui représente 5 à 6 m² de sur-

THOMAS LOUAPRE/DIVERGENCE

Près de 450 000 particuliers ont équipé leurs toits de panneaux photovoltaïques en France (ici une maison autonome en Loire-Atlantique).

face de panneaux, produit entre 1200 et 1500 kilowattheures selon la région. Mais cette énergie est par définition intermittente. Le taux de couverture représente la part d'électricité photovoltaïque par rapport aux besoins annuels du foyer sur l'année. Selon l'orientation de la maison, la productivité des panneaux, la surface photovoltaïque, il est compris entre 15 et 30 %.

Comment se lancer ? Il existe aujourd'hui des kits photovoltaïques que l'on branche tout simplement à une prise de courant du logement. Ces matériels comprennent le ou les panneaux, les micro-onduleurs qui transforment le courant continu en courant alternatif et les câbles de connexion. Ils sont homologués par les pouvoirs publics selon des critères techniques stricts.

J. CHISCANO/SER

« Avec la loi d'accélération des énergies renouvelables adoptée en mars, le contexte énergétique fait exploser la demande »

Alexandre Roesch, délégué général du Syndicat des énergies renouvelables (SER)

Ainsi, la tension en courant continu des modules photovoltaïques doit être inférieure à 120 volts, qui représentent la limite haute de la très basse tension qui équipe les logements (lesquels sont en 220 volts en courant alternatif). Le matériel doit être branché à une prise de terre. Le SER et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) viennent de publier un guide répertoriant toutes les consignes techniques à respecter. Les coûts d'achat et d'installation de base sont inférieurs à 2000 euros. Ces matériels sont en vente dans les chaînes de magasins de bricolage. L'installation nécessite l'intervention d'un professionnel.

Il faut changer ses habitudes de consommation

Comment bien déterminer la dimension de son installation ? Il faut d'abord étudier la puissance de ses appareils et ses habitudes de consommation au cours de la journée et selon les saisons et établir ainsi sa « courbe de charge ». Pour les logements équipés d'un compteur Linky, l'information est accessible sur le compte client d'Enedis. Ces données permettent de faire la différence entre le « talon » et les autres usages électriques. Le « talon », c'est la consommation incompressible des appareils toujours allumés : VMC, réfrigérateur, congélateur. La connaître permet de choisir la part des besoins qui seront couverts par l'autoconsommation. En moyenne, il faut compter 1 kWc. Entre 1 et 3 kWc, on peut étendre l'autoconsommation à d'autres usages comme le cumulus, la machine à laver, la climatisation. Attention, le chauffage électrique ne doit pas entrer en ligne de compte car il risquerait de surdimensionner l'installation, la rendant trop puissante l'été alors que l'hiver le solaire est moins productif. Selon l'Ademe, il faut prévoir un investissement de 2500 à 2800 euros pour 1 kWc posé, près de 8500 euros pour 3 kWc.

Pour optimiser l'autoconsommation, il faut ensuite changer ses habitudes ▶

POUR EN SAVOIR PLUS

Sur l'installation de panneaux solaires

Les kits photovoltaïques
▸ sciav.fr/915kits

Les conditions de raccordement
▸ sciav.fr/915raccordement

Sur les aides financières

L'Anah
L'Agence nationale d'amélioration de l'habitat est l'organisme qui instruit les dossiers de demande d'aides à la rénovation.
▸ sciav.fr/915anah

Éco-prêt à taux zéro
C'est un prêt accessible sans conditions de ressources pour financer des travaux d'amélioration de performance énergétique.

TVA à 5,5 %
Ce taux réduit s'applique aux travaux d'amélioration de la qualité énergétique des bâtiments.

Certificats d'économie d'énergie
Les entreprises qui vendent de l'énergie peuvent proposer à leurs clients des aides à la rénovation, les économies ainsi générées leur servant à justifier auprès de l'État leur action pour diminuer les consommations d'énergie.

MaPrimeRénov'
Elle concerne tout type de logement principal et bénéficie aux propriétaires occupants comme aux propriétaires bailleurs. Les travaux d'isolation et de changement de type de chauffage sont ciblés. Cette aide finance les audits énergétiques préalables aux travaux.

France Rénov'
Pour tout projet, solliciter l'aide gratuite des conseillers France Rénov' est la première démarche à effectuer. Pour trouver le conseiller le plus proche :
▸ france-renov.gouv.fr
0.808.800.700.

MAGALI COHEN / HANS LUCAS

Les toits des bâtiments de plus de 500 m² devront désormais être équipés de panneaux photovoltaïques (ici, une ferme viticole dans le Var).

▸ et oublier le réflexe « heures creuses » de la nuit. L'usage des appareils électriques doit en effet coïncider avec l'ensoleillement. Il faut donc programmer les appareils au milieu de la journée quand le soleil est au zénith, profiter de ces heures pour charger les batteries des téléphones, ordinateurs, etc. et passer l'aspirateur. Le plus simple est d'installer des outils de domotique conçus pour aider à la gestion des appareils.

Partager la production entre voisins, une pratique croissante

Ensuite, il est possible d'envisager l'autoconsommation de façon collective en partageant la production solaire entre voisins. La première communauté énergétique française a été créée en mars 2020 sur l'île d'Yeu (Vendée). Elle réunit cinq producteurs qui ont installé sur le toit de leurs maisons 64 panneaux photovoltaïques. La production est partagée entre 23 foyers du même lotissement. À l'initiative de l'expérience, Engie a constaté après trois ans de fonctionnement un taux d'autoconsommation de 96 % et un taux de couverture de 19 %, ce qui a permis de réduire les factures de 40 % pour les producteurs et de 15 % pour les acheteurs puisque l'électricité fournie par le voisin est moins chère que celle d'EDF. Engie a abandonné la gestion de la boucle énergétique aux producteurs qui sont désormais indépendants. « *L'intention est évidemment d'accroître la taille de la boucle d'autoconsommation collective en y intégrant de nouveaux membres,* ambitionne Michel Bourgery, adjoint au maire de l'île d'Yeu. *Forte également de l'expérience acquise sur ce projet, la mairie est à même de répliquer le concept aussi bien pour des groupes d'habitants intéressés que pour ses besoins propres, favorisant ainsi la production d'énergie décarbonée et solidaire à un prix qui n'est pas soumis à la volatilité des marchés.* »

Cette approche collective commence à se répandre en France, à l'échelle de la commune. « *En 2022, cela a été une véritable explosion en corrélation avec les tensions sur le marché de l'énergie,* savoure Vianney de l'Estang, président de Smart Energies, une entreprise spécialisée dans les toitures solaires. *Et l'obligation désormais d'équiper les bâtiments de plus de 500 m² de toiture va encore accélérer les projets.* »

À la suite de l'île d'Yeu, ce sont environ 150 projets qui ont été réalisés et plus de 200 sont en attente d'enregistrement par Enedis, le distributeur basse tension étant chargé de mesurer les flux entrants et sortants d'électricité de ces coopératives d'un nouveau genre.

Des modes de gestion de plus en plus variés

Les configurations sont de plus en plus diverses. Spécialiste de gestion de ces réseaux, Rémi Bastien, directeur général d'Enogrid, distingue trois catégories. « *L'autoconsommation patrimoniale est le fait de collectivités qui relient entre eux des bâtiments communaux pour réduire les factures. L'autoconsommation collective ouverte réunit des acteurs différents qui sont voisins, comme des entreprises sur une zone d'activité ou un supermarché qui distribue l'électricité quand il est fermé. Et enfin, avec l'autoconsommation sociale, un bailleur de HLM donne gratuitement l'électricité pour faire baisser les charges des locataires.* » Il y a deux cas de figure. Soit le porteur de projet garde la main sur la gestion de l'installation, soit il la délègue à une société dont c'est le métier. Sur ce secteur, on trouve aussi bien des multinationales comme Engie ou EDF énergies renouvelables que des start-up comme Enogrid ou Smart Energies.

La loi sur l'accélération des énergies renouvelables a simplifié les démarches administratives et Enedis a créé un guichet réservé à la gestion de ces projets. Mais il faut formaliser par contrat les relations entre les autoconsommateurs et gérer au jour le jour les flux d'énergie. C'est le travail d'Enogrid qui invente ainsi une nouvelle activité en créant des logiciels permettant une exploitation fluide de structures qui à l'avenir compteront des centaines de participants. ■ **L. C.**

ÉOLIEN

À la recherche d'un nouveau souffle

Après une décennie d'escroqueries, le marché du petit éolien s'est assaini. La démarche est coûteuse, mais les particuliers peuvent désormais s'équiper efficacement.

2500 à 4000 € Coût d'une éolienne verticale	**10 000 à 40 000 €** Coût d'une éolienne horizontale	**3000 €** Coût du raccordement au réseau pour revendre son surplus d'électricité	**10 à 20 ans** Retour sur investissement

Si la route vers l'équipement solaire est techniquement bien balisée et subventionnée *(lire p. 50)*, celle du petit éolien (domestique ou individuel) s'est enfoncée dans le brouillard. Comment équiper efficacement une habitation, des bureaux, une exploitation agricole ou un terrain isolé, avec un aérogénérateur de taille réduite, dont la capacité de production n'excédera pas 36 kilowatts (kW), la puissance maximale autorisée en cas de raccordement au réseau ? Les données récentes et fiables sont rares. Le guide pratique édité par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) date de 2015. La dernière étude sur l'état de l'art et du marché, concentrée sur le sud de la France, menée par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), remonte à 2016. Il est impossible de savoir combien de particuliers ont installé des éoliennes domestiques. Le Sepen, site expérimental pour le petit éolien fondé en 2004, et seul indépendant de France, est à l'arrêt. En 2007, la manne des crédits d'impôts d'État (aujourd'hui supprimés) avait vu éclore des « *installateurs non qualifiés, souvent malhonnêtes, proposant des dispositifs inadaptés à un prix de vente exorbitant et aucun service après-vente pour du matériel rapidement défectueux* », note Myriam Lorcet, du Cerema.

Bonne nouvelle, le marché s'est assaini. « *Un coup d'arrêt a été mis au Far West des pales* », note Éric Moreno, conseiller en énergie renouvelable de la région Occitanie. Les régions imposent désormais des critères et paramètres techniques plus précis avant de financer un projet (les subventions pouvant aller jusqu'à 50 %). Les demandes et agréments ont dégringolé (jusqu'à -70 % entre 2012 et 2016), mais empêchent les installations défaillantes. Ainsi, les éoliennes de pignon sont aujourd'hui systématiquement déconseillées : elles engendrent fissurations ou fracturations du mur sur lequel elles reposent.

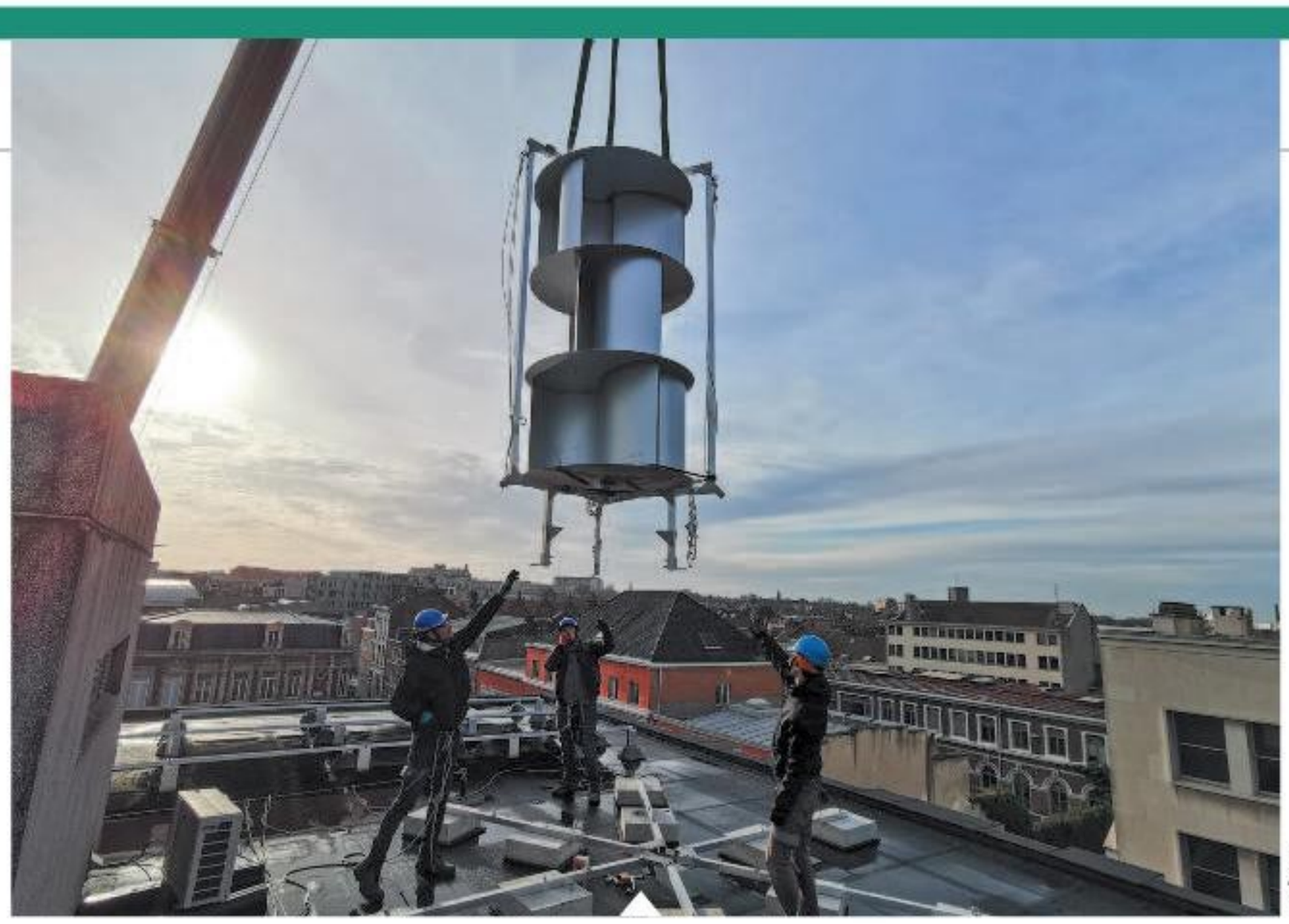
Pour savoir si le petit éolien est recommandé et subventionné sur son ter- ▶

ritoire, il faut consulter sa direction régionale. C'est le cas en Paca, en Occitanie, en Normandie, alors que la Bourgogne Franche-Comté s'y refuse après avoir constaté que la vitesse moyenne annuelle de 5,5 m/s du vent n'est pas atteinte à 10 m de hauteur. Car l'important pour le petit éolien, c'est la rose des vents et l'évaluation précise de chaque potentiel individuel. Les fabricants et installateurs sérieux pilotent eux-mêmes l'ensemble des études de faisabilité, avec l'aide d'un bureau agréé. Ces tests requièrent d'installer un mât de mesure équipé d'anémomètres, d'une girouette et d'un enregistreur qui calcule la vitesse et la direction du vent — plus ou moins favorables selon la typologie du terrain (en hauteur, dégagé ou non, etc.).

Estimer la production potentielle sur un an

Les données recueillies sont à comparer avec celles générées par les stations Météo France les plus proches. Les données à moyen et long termes de ces stations (payantes) permettent d'extrapoler sur dix ans celles recueillies par le mât de mesure. On en tire la vitesse moyenne du vent sur son site et sa distribution. En recoupant ces données avec la courbe de puissance de l'aérogénérateur choisi, il est possible d'estimer la production potentielle de l'éolienne sur un an. Un particulier peut poser une éolienne directement sur son toit, ou sur un mât mesurant généralement de 8 à 20 m de haut. Les pales peuvent atteindre une taille allant jusqu'à 65 % de la hauteur du mât. Attention, les éoliennes sont interdites en zone protégée (réserves naturelles, immeubles patrimoniaux) ou classées par le plan local d'urbanisme (PLU). Un aérogénérateur de moins de 12 m de haut nécessite une déclaration préalable de travaux. Au-delà de 12 m, l'obtention d'un permis de construire est obligatoire. L'estimation du coût de l'investissement dans une éolienne domestique dépend de plusieurs facteurs : moins le potentiel éolien est élevé, plus l'installation sera imposante et onéreuse. Le coût peut osciller entre 2 500 euros et 40 000 euros. Depuis le 1er janvier 2016, l'installation d'une éolienne individuelle n'est plus éligible au crédit d'impôt (aujourd'hui MaPrimeRenov'), ni aux certificats d'économie d'énergie (CEE). Néanmoins, des aides départementales, régionales, européennes, ou du Cas Facé (financement des aides aux collectivités pour l'électrification rurale) permettent de réduire l'investissement de départ.

Il faut choisir également entre une installation autonome ou reliée au réseau électrique. Dans le premier cas, l'éolienne répondra aux besoins énergétiques d'éclairage ou de toute l'habitation. Pour alimenter l'ensemble d'un foyer, il faut s'équiper d'un régulateur avec redresseur intégré, qui transforme le courant alternatif en courant continu, et aussi de batteries pour une utilisation à tout moment, que le vent souffle ou pas. Parmi les batteries à décharge profonde (qui peuvent subir un nombre important de cycles de recharge), différentes technologies existent : sodium-ion (technologie émergente, mais la plus rapide à la recharge selon le CNRS) ; lithium (gourmande en terres rares, avec une recharge plus longue) ; plomb (qui présente un risque de fuite de gaz ou d'acide) ; ou



UNÉOLE

Adaptée au milieu urbain, l'éolienne à axe vertical, peu encombrante, s'installe aisément sur un toit d'immeuble et fonctionne avec des vents faibles ou tourbillonnants.

ADEME - BRUNOBOURGEOIS

Les zones les plus fortement ventées se situent sur la façade ouest et sur le pourtour méditerranéen.

CEREMA

« L'éolienne à axe vertical est efficace en milieu urbain sans générer des ondes acoustiques et électromagnétiques »

Philippe Dunez, chargé d'études en acoustique et vibrations au Cerema

encore gel de silice (plus chère mais plus étanche que celle au plomb). À l'inverse, une installation reliée au réseau électrique ne nécessitera pas de stockage. Le coût du raccordement peut atteindre 3000 euros, mais cette solution permet de revendre son surplus d'électricité voire toute sa production à EDF dans les zones de schéma régional éolien.

Deux modèles à choisir selon le lieu d'installation

Reste à choisir le type d'éolienne. Celle à axe horizontal est la plus couramment utilisée. Juchée sur un mât, idéale dans un jardin, parfaite pour pomper de l'eau dans un terrain isolé, elle offre les meilleurs rendements mais est également la plus chère et la plus bruyante. Plus abordable, l'éolienne à axe vertical, de type Savonius ou Darrieus, peut se fixer sur le toit et fonctionne même avec des vents faibles ou turbulents (générés par les obstacles, végétaux ou bâtis). Son utilisation en ville a longtemps été décriée comme étant trop peu efficace et génératrice de nuisances. Mais une étude du Cerema sur le projet Urbéol à Arras (Hauts-de-France) a montré en 2020 qu'un modèle Savonius de 3,85 m de haut et 2 m de large produit 200 à 1000 kWh par an, selon les intensités des vents. Elle est donc *« efficace en milieu urbain sans générer de problèmes d'ondes acoustiques, électromagnétiques »*, explique Philippe Dunez, du Cerema. Il a toutefois fallu adapter sa fixation, avec des plots de béton, pour limiter les secousses vibratoires sur son bâtiment d'accueil. Enfin, l'innovation ne tarit pas. Se développent notamment des « turboliennes », contraction de turbine et éolienne, à jucher sur les toits, puissantes et silencieuses, munies d'un double rotor, et dont l'un des prototypes a été validé par le CEA et l'École polytechnique. Après des décennies de vents contraires, l'éolien semble prendre un nouveau souffle. ■ **R. M.**

MICROHYDRAULIQUE

Ne pas se retrouver à sec

Très onéreuse, soumise à d'interminables procédures, découragée par les pouvoirs publics, la petite hydroélectricité s'inquiète en outre des sécheresses répétitives à venir. Pourtant, il y a du potentiel.

5000 à 8000 €	2,5 à 10 ans	Entre 12 et 20 ans
Coût par kW installé	Durée du projet	Retour sur investissement

Sur votre terrain coule une rivière au fort débit, avec une hauteur de chute significative : pourquoi ne pas envisager une petite centrale hydroélectrique ? Elles sont peu courantes, car soumises à de multiples contraintes techniques et administratives. Pourtant, en 2019, elles représentaient 2,2 gigawatts en capacité installée, avec 2700 installations produisant en moyenne 6 térawattheures, soit environ 10 % de la production hydraulique nationale (première source d'électricité renouvelable en France).

La petite hydroélectricité (PHE) correspond à des installations dont la puissance est inférieure à 10 mégawatts (MW). Les équipements de plus de 4,5 MW dépendent du régime des concessions ; en deçà, elles nécessitent une autorisation environnementale, délivrée par le préfet pour une durée limitée (deux à dix ans), et dont les règles d'exploitation dépendent des enjeux environnementaux du site concerné. Il s'agit de ne pas perturber le milieu naturel et les écosystèmes, notamment en maintenant un débit minimal du cours d'eau (au moins un dixième du débit moyen). Elles doivent aussi préserver des passages pour les poissons migrateurs et les sédiments.

Hormis les roues à aubes, utilisées en rénovation de patrimoine, on distingue plusieurs grandes catégories de turbines modernes. Les turbines à action : injectée à puissance maximale, l'eau entraîne la rotation de la roue et ressort en pluie. Les turbines à réaction : l'eau est guidée pour rentrer sans choc dans la roue et se met en vitesse maximale à sa sortie. Les vis hydrodynamiques : l'écoulement fait tourner une vis d'Archimède raccordée à un bloc multiplicateur et générateur. Les poissons peuvent les traverser mais elles perdent en puissance dans les rivières très calcaires et sensibles aux phénomènes d'eutrophisation. Enfin, le système « Very Low Head » (« très faible hauteur de chute »), immergé, intègre une turbine de grand diamètre et un générateur de courant.

Les données hydrologiques fournies par la direction départementale de l'eau et des forêts (DDAF) et la direction régionale de l'environnement (Diren) sont hélas insuffisantes pour bien choisir l'équipement adapté à son cours d'eau. *« Les particuliers ne sont pas* ▶

aidés en France, voire découragés par les pouvoirs publics, constate-t-on au Syndicat national de la petite hydroélectricité, dont les adhérents exploitent aujourd'hui environ 600 centrales. *Mais il existe un petit îlot de résistance en Bourgogne-Franche-Comté.* » Sur ce territoire au fort potentiel, pas moins de dix moulins et centrales ont été raccordés au réseau en 2020. Dans cette région, et c'est un cas unique, l'Ademe structure et finance l'accompagnement des porteurs de projets avec l'association Adera. L'offre s'étend du démarrage du projet (évaluation du potentiel, rédaction du cahier des charges pour les études de faisabilité, bilan réglementaire) à la mise en service des installations, puis à son suivi. « *Il faut aussi travailler sur les tarifs, les obligations d'achat, l'optimisation du site… Plusieurs longues années sont nécessaires pour mener à bien un projet* », souligne Fabrice Bouveret, de l'Adera, qui organise des formations.

Il est préférable de sous-dimensionner les installations

Le coût d'une centrale varie selon la configuration des lieux, le type de matériel, le raccordement au réseau électrique et les aménagements écologiques à réaliser. Hors la mise en place d'une passe à poissons, le budget est de 5000 à 8000 euros par kilowattheure (kW) installé. Il peut atteindre 10000 euros par kW pour une installation inférieure à 30 kW. Mais selon les performances environnementales du projet, il est possible de bénéficier d'aides financières de la région, pour les études de faisabilité, allant jusqu'à 70 %. « *Le changement climatique est un enjeu,* précise Lilian Geney de l'Ademe, *mais nous savons gérer les faibles débits, et recommandons de sous-dimensionner les installations pour anticiper d'ici à 2030.* » Quant aux crues, qui peuvent devenir plus marquées, les centrales ne les aggravent pas. ■ **R. M.**

GÉOTHERMIE

Utiliser la chaleur du sol pour se chauffer

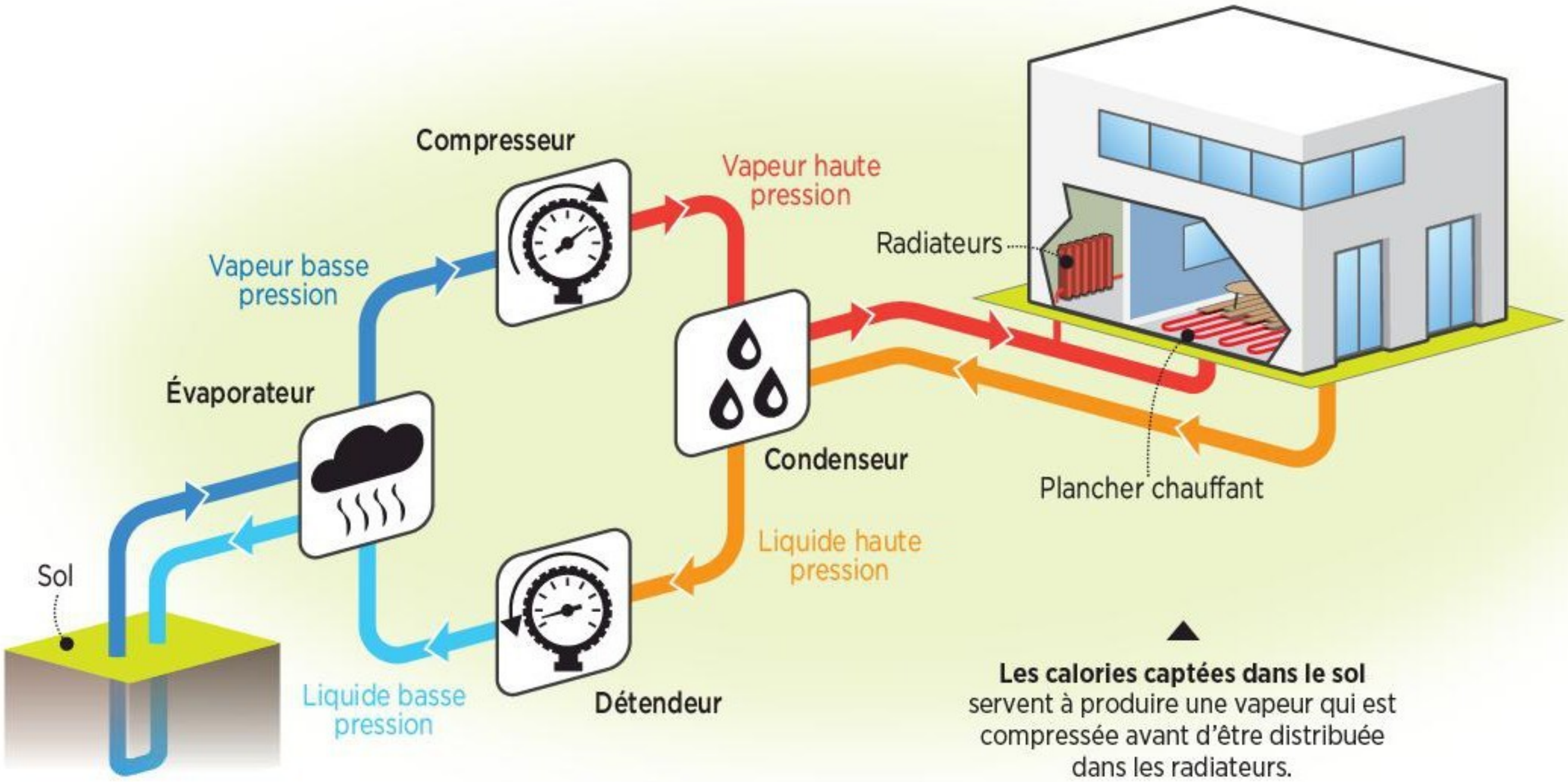
Cette technique encore peu répandue fournit une chaleur locale, inépuisable et aux coûts invariables.

150 € par m²	5000 €	30 000 €	8 à 19 ans
Coût des travaux de forage pour le captage horizontal	Coût du matériel (pompe à chaleur et échangeur)	Prix indicatif pour une maison de 120 m²	Retour sur investissement (selon le prix du gaz naturel)

On l'oublie trop souvent : les particuliers consomment bien plus d'énergie pour se chauffer que pour s'éclairer et faire fonctionner leurs appareils électriques. Le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation représentent en effet 80 % de la consommation finale du secteur résidentiel. Or, les trois quarts des besoins des foyers sont encore couverts par le gaz et le fioul, contre un quart par les énergies renouvelables (bois, pompes à chaleur). 95 % des bâtiments ont une chaudière individuelle, les réseaux de chaleur ne représentant que 5 % de l'ensemble. La tendance actuelle est de remplacer les appareils au fioul ou au gaz par des pompes à chaleur air/eau. Or, il existe une solution bien plus efficace : la géothermie de surface. Aujourd'hui, elle ne représente pourtant que 1 % de la consommation finale de chaleur. Aussi, le 2 février, le gouvernement a lancé un plan d'action pour augmenter cette part de marché. En 2020, on dénombrait en France 195 000 pompes à chaleur géothermiques, 9200 dans le tertiaire et 2300 dans les immeubles collectifs. L'objectif de nouveau plan gouvernemental est de doubler le nombre de ces installations dès 2025.

Celles-ci pourraient en théorie être installées presque n'importe où : selon le Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM), pas moins de 98 % du territoire est éligible à la géothermie de faible profondeur ! Le BRGM évalue à 100 térawattheures (TWh) annuels le potentiel d'économie de gaz naturel, soit un peu plus que la consommation française de gaz russe en 2021. Ainsi, la presque totalité de Paris et de la région parisienne pourrait utiliser ce type de source de chaleur, ainsi que vient de le montrer une étude conjointe de l'Ademe et du BRGM. Le village des athlètes des jeux Olympiques de 2024 sera chauffé de cette manière.

La géothermie de surface, dite aussi à basse température, consiste à exploiter la chaleur emmagasinée dans les premiers mètres de sol ou dans des nappes d'eau entre 0 et 100 mètres de profondeur. La température ne dépasse pas



Les calories captées dans le sol servent à produire une vapeur qui est compressée avant d'être distribuée dans les radiateurs.

BRUNO BOURGEOIS

les 30 °C mais elle est très stable. Les calories captées dans le sol sont acheminées vers un compresseur pour en augmenter la température d'un liquide et produire une vapeur à haute pression distribuée dans les radiateurs du logement. À partir d'un sol à 12 °C, on peut ainsi produire de l'eau à 50 °C. Mieux, contrairement aux pompes à chaleur à air qui cessent d'être efficaces quand les températures deviennent négatives, les géothermiques demeurent performantes toute l'année car la température du sol varie peu. La puissance moyenne d'une pompe géothermique est de 12 kilowatts (kW), ce qui est équivalent à une chaudière à gaz de 25 kW utilisée pour un logement de 100 m². Le principal avantage de la géothermie, c'est qu'elle fournit une chaleur locale, inépuisable et au coût de production invariable. Selon l'Ademe, en 2020, celui-ci se situait entre 80 et 130 euros le mégawattheure, contre 110 à 115 euros pour le gaz et 130 à 160 euros pour le fioul, des évaluations faites avant la crise actuelle de l'énergie.

Une aide de 5000 euros pour l'installation

Il existe plusieurs méthodes pour capter la chaleur du sol, qui dépendent de la composition géologique de l'endroit, de la présence ou non d'une nappe phréatique. La méthode la moins onéreuse et la plus utilisée dans le secteur individuel repose sur des capteurs horizontaux. Il s'agit de tubes qui serpentent sous le sol à une profondeur comprise entre 50 centimètres et un peu plus d'un mètre. La température y est peu élevée (autour de 12 °C). Pour chauffer une maison de 100 m², il faut prévoir le double de surface. Une pompe à chaleur géothermique consomme 30 % d'électricité en moins qu'une pompe à chaleur air, et sa durée de vie est de trente ans contre vingt ans. Pour les petits immeubles ou les petites entreprises, il faut installer des capteurs verticaux. Les sondes géothermiques sont alors des tubes en forme de U qui plongent dans le sol à des profondeurs de 30 à 100 mètres. Suivant la configuration du sous-sol, la source de chaleur peut être le sol lui-même ou une nappe phréatique. Le rendement est bien meilleur que pour des capteurs horizontaux, mais les coûts de forage sont plus élevés.

Il existe néanmoins une solution moins onéreuse : le puits canadien. Elle consiste à faire circuler naturellement de l'air provenant d'une canalisation enterrée à deux à trois mètres de profondeur, où l'hiver la température est plus élevée de 5 à 7 °C par rapport à l'extérieur et, inversement, plus basse l'été. Un système de chauffage et de refroidissement gratuit en somme.

Une pompe à chaleur géothermique consomme 30 % d'électricité en moins qu'une pompe à chaleur air, et sa durée de vie est de trente ans contre vingt ans

Le problème est de financer l'investissement de base. Les incitations provenant de la nouvelle réglementation thermique des bâtiments, les aides MaPrimRenov', ou l'éligibilité aux certificats d'économie d'énergie font baisser l'addition *(lire p. 52)*. Les espaces France Rénov' présents dans toute la France délivrent des conseils sur l'élaboration technique des projets et leur financement, le tout gratuitement et sous la garantie de l'État. Le nouveau plan gouvernemental a porté en mars l'aide pour toute installation d'une pompe à chaleur géothermique à 5000 euros, quel que soit le niveau de revenu. Avec ce coup de pouce, le gouvernement estime qu'un chauffage géothermique peut être couvert à 90 % par des aides pour les ménages les moins aisés.

Augmenter le nombre de foreurs qualifiés

L'État va également financer une cartographie de la géothermie de surface pour distinguer les zones vertes où les forages ne posent pas de problèmes graves de stabilité des sols (86 % du territoire), des zones orange où l'activité est soumise à l'avis d'un expert (16 %) et enfin les zones rouges d'interdiction (2 %).
Si vous décidez de franchir le pas, vous risquez de vous heurter à un autre obstacle, structurel. Il n'existe en France que 70 foreurs professionnels, la plupart du temps de petites entreprises*. L'ensemble du territoire n'est donc pas couvert par la profession. Le plan gouvernemental prévoit un développement de la formation en géothermie de surface dite de minime importance. Les foreurs doivent en effet posséder une qualification qui impose notamment de se former au métier auprès d'un foreur qualifié pendant deux ans. ■ **L. C.**

* Les entreprises éligibles à ces travaux sont répertoriées sur France Rénov' : sciav.fr/915travaux

« LOW-TECH »

Vivre mieux avec moins

Les « technologies douces » ne sont pas l'apanage de marginaux et d'artisans chevronnés. Elles intéressent désormais les citoyens et gagnent les écoles d'ingénieurs.

Selon Lisa Carrière, de l'université Jean-Monnet Saint-Étienne, c'est *« principalement dans le domaine de l'énergie »* que les technologies douces — c'est-à-dire utiles, durables, accessibles au plus grand nombre, sobres — sont en train de gagner du terrain dans toute la société. Le 21 mars, l'École centrale de Nantes organisait même son premier Forum Low-Tech avec étudiants, acteurs du territoire et entrepreneurs. L'établissement a institué une option « ingénierie des low-techs » en 2022, comme d'autres à Lille ou Grenoble, etc., souvent à la demande d'élèves préoccupés par le changement climatique ou l'épuisement des ressources planétaires. Le plus frappant est que ces pédagogues, formant l'élite des constructeurs, instituent désormais des partenariats avec des associations comme celle du Low-tech Lab, fondé en 2010 au Bengladesh en testant des petits systèmes de technologie minimaliste sur une embarcation en toile de jute. Ce Low-tech Lab est devenu une référence très populaire auprès des citoyens qui ont envie d'agir à leur niveau et de mettre la main à la pâte, en bricolant des « systèmes » qui leur permettront de vivre mieux avec moins. Elle recense un grand nombre d'adresses, quels que soient les besoins et la localisation de chacun.
« Contrairement au développement durable, dont la genèse peut être rattachée à un travail de définition de la part des instances de l'ONU, le concept des low-tech a émergé des courants de pensée alternatifs des années 1970 sans qu'il y ait d'appropriation institutionnelle », explique Anne-Charlotte Bonjean, qui a piloté le rapport de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la transition énergétique), « Démarches Low Tech » en 2022. Aujourd'hui, les définitions sont multiples et mouvantes, même si le terme a été popularisé en France par l'ingénieur centralien Philippe Bihouix, auteur de *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable* (Seuil, 2014). *« Le qualificatif s'applique*

ADEME

« Le concept a émergé des courants de pensée alternatifs des années 1970 sans qu'il y ait d'appropriation institutionnelle »

Anne-Charlotte Bonjean, ingénieure réparabilité, pilote de l'étude « Démarches Low Tech » de l'Ademe

EMMA PROSDOCIMI/SIPA

Ce four conçu par Arnaud Crétot fonctionne uniquement à l'énergie solaire, et cuit chaque jour une centaine de kilos de pain.

à une démarche et non pas à son résultat », estime l'Ademe. Ainsi, un objet n'est pas *low-tech* dans l'absolu, il l'est plus (ou moins) qu'une solution existante répondant au besoin initial (se chauffer, cuisiner, stocker de l'énergie, etc). Son concepteur, son constructeur, vise l'essentiel mais ne dédaigne pas l'innovation, à condition qu'elle soit frugale (recyclage, limitation des déchets), rentable, aisément réparable et utilise au maximum des ressources locales et non menacées.

Aujourd'hui, dans des ateliers locaux ou avec des tutoriels sur Internet, des Français construisent une éolienne Piggott avec le réseau Tripalium, fabriquent un habitat mobile autonome en eau et en énergie avec l'Atelier Hirondelle, bâtissent un barbecue ou un four solaire (pliant ou non), des capteurs solaires pour les résidences secondaires où se propagent humidité et moisissures, mettent au point un chauffe-eau solaire ou une serre semi-enterrée, reconditionnent ou réparent une batterie électrique…

Les agriculteurs aussi adoptent cette démarche

Impossible d'évaluer combien de citoyens ont recours à ces solutions, qui ne concernent pas que les particuliers. Le boulanger et torréfacteur Arnaud Crétot, installé en Seine-Maritime, cuit dans son jardin depuis 2021 une centaine de kilos de pain par jour sans dépenser un centime d'électricité. *« En exploitant un ensemble de miroirs mobiles, on parvient à concentrer les rayons du soleil vers un foyer central où est placé un four à pain,* explique cet ingénieur de formation dans un livre où il raconte son expérience*. *J'utilise un four Lytefire de la société Solar Fire — dont je suis le cofondateur.* » C'était une première en France et il commence à faire des émules.

Dans le domaine alimentaire, on favorise la réfrigération passive, comme avec le « frigo du désert » qui s'appuie sur l'évaporation pour garder les aliments au frais et est utilisé à grande échelle à la ferme de la Martinière (Loire). Ailleurs, d'autres techniques, comme le séchoir ou la stérilisation solaire, permettent de chauffer les aliments pour les conserver. Pour les agriculteurs, la tendance est de démécaniser, privilégier des appareils économes en énergie et prioriser leur réutilisation et leur réparation, même si *« il n'y a aujourd'hui en France que très peu de recherche et développement portant sur des outils permettant un certain degré d'autonomie »*, regrette l'association les Greniers d'Abondance. Petits ou grands, les acteurs de la *low-tech* espèrent maintenant une réglementation plus favorable et des aides financières d'État adaptées, de la recherche et développement et même des commandes publiques. ■ **R. M.**

@RachelFleaux

* *La Boulangerie solaire*, Terre vivante, 2023.

HERVÉ LEXTRAIT

DIRECTEUR DU PÔLE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE CHEZ ENEDIS

« Produire son électricité verte est une démarche responsable »

L'autoconsommation individuelle décolle en France et oblige à repenser le réseau de distribution. Car celui-ci doit intégrer les excédents de production et à l'inverse prendre le relais en l'absence de soleil ou de vent. Une mutation qui demande de grands investissements.

Quels sont les changements de modes de consommation que doivent anticiper les distributeurs d'électricité ?
Une électricité verte, locale, issue de sa propre production, et un pilotage de la recharge de son véhicule électrique en premier lieu. 630 000 installations photovoltaïques ont été raccordées au réseau de distribution fin 2022, soit 90 000 installations de plus en un an. Et le rythme va s'accélérer. Dans le document préliminaire à notre futur Plan de développement de réseau, nous estimons sur la base de la précédente programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) que 28 gigawatts (GW) d'éolien et 42 GW de photovoltaïque seront raccordés au réseau public de distribution d'électricité à l'horizon 2032, ce qui représente 4 à 5 GW d'énergies renouvelables par an [la puissance installée du parc de production d'électricité en France est d'environ 140 GW]. 13 millions de véhicules électriques et hybrides rechargeables seront en circulation en 2032. Ainsi, Enedis envisage d'investir plus de 5 milliards d'euros par an jusqu'en 2032, avec un pic en 2027 à 5,5 milliards d'euros en raison de la construction d'infrastructures de recharge pour véhicules électriques dans le résidentiel collectif. Les usages vont s'électrifier non seulement avec les voitures mais aussi avec les pompes à chaleur.

Quel développement prévoyez-vous pour l'autoconsommation et qu'est-ce que cela va changer pour les distributeurs ?
Le nombre d'installations en autoconsommation individuelle en France métropolitaine a quasiment doublé en 18 mois pour atteindre une puissance totale de 1300 mégawatts (MW). Fin 2022, la France comptait près de 240 000 clients autoconsommateurs individuels raccordés au réseau public de distribution d'électricité. Il s'agit principalement de clients équipés d'installations photovoltaïques d'une puissance de moins de 36 kilovoltampères (kVA). Nous nous attendons à ce que l'essor de l'autoconsommation se poursuive. Pour Enedis, le fait d'autoconsommer ou d'injecter la production est parfaitement neutre pour dimensionner le réseau. Cela signifie qu'une installation photovoltaïque prendra la même place, que celle-ci soit autoconsommée ou non. Dans nos modèles, c'est bien la somme des puissances renouvelables qui dimensionnera globalement le réseau qu'il faut développer. Il nous faut tenir compte de la concentration de ces installations, notamment dans les zones rurales où le réseau est moins dense, mais aussi prévoir leur développement.

Où est l'intérêt du consommateur ?
Réaliser une installation en autoconsommation permet de produire sa propre électricité verte. On peut considérer qu'il s'agit d'une démarche responsable, au même titre que le choix d'une offre de fourniture verte auprès d'un fournisseur d'électricité. Cela permet aussi de maîtriser une partie des dépenses de son foyer dans la durée, en couvrant parfois plus de 20 % de ses besoins en électricité. Notre objectif principal est d'anticiper et de planifier au mieux les raccordements des futurs producteurs d'électricité renouvelable. De notre côté, nous devons être toujours plus réactifs et plus visibles pour

> « Fin 2022, la France comptait près de 240 000 clients autoconsommateurs individuels raccordés au réseau public de distribution »

NICOLAS GOUHIER/ENEDIS

> « Raccorder une installation de production n'est pas un geste anodin, cela nécessite l'intervention d'un professionnel »

nos clients, en poursuivant la simplification de nos procédures et en modernisant nos systèmes d'information.

Les modes collectifs de production et de consommation à l'échelle de quartiers ou de collectivités vont-ils se développer ?

Nous constatons un fort intérêt pour le partage d'une électricité verte produite localement entre plusieurs personnes. En 2018, la France ne comptabilisait que six opérations d'autoconsommation collective ; elles sont 169 à fin février, constituées de plus de 2000 consommateurs et plus de 300 producteurs pour une puissance totale de 10 MW, majoritairement des panneaux photovoltaïques. Cette modalité de partage de l'électricité séduit notamment les collectivités, qui portent à elles seules 100 opérations d'autoconsommation collective. Les bailleurs agréés HLM sont également bien représentés avec 31 opérations. Notre rôle est d'accompagner et de favoriser l'extension de l'autoconsommation collective en France. Cependant, l'autoconsommation ne signifie pas autarcie. En effet, la variabilité des énergies renouvelables nécessite d'être raccordé au réseau de distribution pour avoir de l'électricité, même lorsque le soleil disparaît ou qu'il fait nuit, ou pour revendre l'excédent de production en l'injectant sur le réseau lorsqu'il fait jour.

On parle par ailleurs de stockage de l'électricité. Concrètement, comment cela va-t-il se traduire chez le particulier ?

Le stockage s'est déjà démocratisé dans les années 1970 avec les ballons d'eau chaude chez les particuliers, qui emmagasinent l'énergie sous forme de chaleur aux heures où elle est la moins chère. Dans un avenir proche, les particuliers auront également la possibilité de stocker leur électricité avec des batteries, et même en utilisant les batteries de leur véhicule électrique pour alimenter les usages électriques de la maison. C'est ce que l'on appelle le « vehicule to home ».

Comment le consommateur va-t-il s'y retrouver pour demander le bon dimensionnement en puissance de son installation ?

Raccorder une installation de production n'est pas un geste anodin, cela nécessite l'intervention d'un professionnel qui devra apporter les garanties de conformité liées notamment à la sécurité électrique. Pour définir leur projet et faciliter leurs démarches, nous conseillons vivement aux clients d'être accompagnés par un spécialiste, qui peut être un installateur, un bureau d'études, un maître d'œuvre ou le fournisseur d'électricité. Par ailleurs, si le nombre d'appareils du foyer qui fonctionnent à l'électricité s'accroît (notamment la pompe à chaleur et la voiture), l'augmentation de la puissance peut être réalisée à distance et sous 24 heures par le fournisseur d'électricité grâce aux compteurs communicants. ■

Propos recueillis par L. C.

@Loic_Chauveau

FUTOSHI HAMADA/ AMAMI HORIZON

« Tokudaia osimensis » a la particularité de pouvoir se passer du chromosome Y, contrairement à la plupart des mammifères mâles.

ERIC GUILLORET / NATUR AGENCY

L'agame barbu (« Pogona vitticeps ») est ZW, mais au nord de l'Australie, il évoluera vers un sytème de détermination par la température.

GETTY IMAGES

De nombreuses espèces de grenouilles, comme ici « Rana japonica », changent régulièrement de chromosome sexuel.

Évolution

Le chromosome masculin en voie de disparition

Sa dégénérescence chez l'humain a commencé il y a plusieurs milliers d'années. La disparition du chromosome Y signifierait-elle la fin des mâles ? Des études montrent que son absence chez d'autres espèces n'a pas supprimé le dimorphisme sexuel et que les deux sexes ont continué de cohabiter.

Par Léna Hespel

Mais qu'arrive-t-il au chromosome Y ? Chez les mammifères mâles, tous en possèdent un. Du moins en théorie. En réalité, quelques rares rongeurs dérogent à la règle. Fin 2022, une étude publiée dans les *PNAS* a révélé le mécanisme à l'origine de la disparition du chromosome Y chez le rongeur japonais *Tokudaia osimensis*. Avant lui, le même phénomène a été constaté chez *Tokudaia tokunoshimensis* et les campagnols *Ellobius lutescens*, *Ellobius talpinus* et *Ellobius tancrei*. De quoi remettre au goût du jour une théorie proposée il y a une vingtaine d'années par la généticienne australienne Jenny Graves, aujourd'hui professeure émérite à l'université La Trobe, à Melbourne (Australie) : le chromosome Y va disparaître chez les humains. Car force est de constater qu'il ne semble pas très vigoureux, comparé au X. Beaucoup plus petit, il possède moins de gènes (environ 50 contre 800 chez le chromosome X). Pourtant, au départ, Y était de la même taille que X. Comment en est-il arrivé là ?

SPL/SUCRÉ SALÉ

« C'est l'absence de recombinaison entre les chromosomes X et Y qui entraîne la dégénérescence de Y et la perte de gènes », explique Deborah Charlesworth, spécialiste de génétique des populations à l'université d'Édimbourg (Écosse). La recombinaison est un phénomène bien connu des généticiens : les chromosomes échangent de l'information génétique. Il s'agit d'un moteur essentiel de l'évolution. Mais dès les

RECOMBINAISON Échange d'information génétique, ici entre deux chromosomes. Il assure un brassage génétique.

PRESSION DE SÉLECTION Contrainte environnementale exercée sur des organismes qui va les amener à évoluer dans une direction donnée.

« FITNESS » (ou valeur sélective) Capacité d'un individu à se reproduire. Elle est mesurée par le nombre de ses descendants qui atteignent la maturité sexuelle.

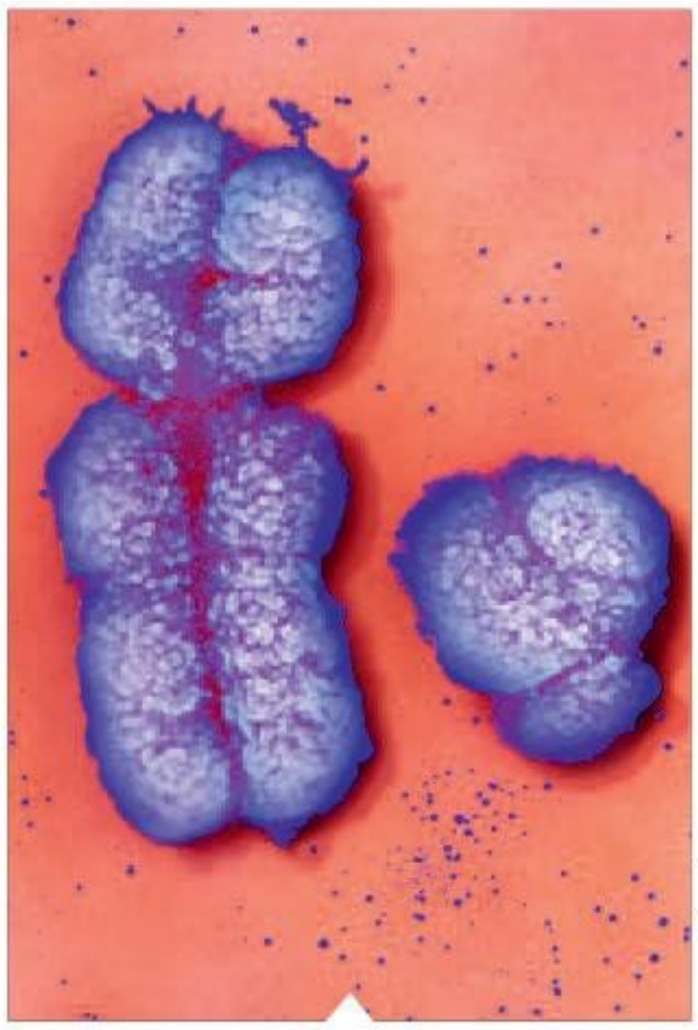
années 1930, une théorie, portée par le biologiste et biostatisticien britannique Ronald Aylmer Fisher, a émergé pour expliquer cet arrêt de recombinaison chez les chromosomes sexuels, celle dite de l'antagonisme sexuel. Elle repose sur le constat que les mâles et les femelles diffèrent dans leur apparence : c'est le dimorphisme sexuel. Certaines versions de gènes dits sexe-antagonistes sont avantageux pour un sexe et désavantageux pour l'autre.

Une vaste base de données des systèmes sexuels

Si un tel gène se situe sur les chromosomes sexuels, alors un arrêt de recombinaison entre le X et le Y permettrait qu'une version avantageuse de ce gène pour les mâles reste sur le Y et ne se retrouvera jamais chez les femelles. C'est cette sélection qui expliquerait l'arrêt de recombinaison, menant à la dégénérescence de Y.

Jamais prouvée, cette théorie a récemment été remise en cause et différents modèles alternatifs ont été proposés. L'un d'eux a été avancé en 2021 par une équipe suisse menée par Daniel Jeffries, bio-informaticien à l'Institut d'écologie et d'évolution de l'université de Berne. Il propose un mécanisme sans lien avec des gènes responsables du dimorphisme sexuel, où une accumulation neutre de divergences entre les deux chromosomes est à l'origine d'un arrêt de la recombinaison. Deux autres modèles ont été proposé en 2022 par des équipes françaises, qui ne reposent pas non plus sur les différences entre mâles et femelles mais sur des modifications chromosomiques.

« Le problème auquel le domaine est confronté est la difficulté de tester les modèles de manière empirique », estime



SPL/SUCRÉSALÉ

Les deux chromosomes sexuels masculins X (à gauche) et Y (à droite), vus au microscope et colorisés.

Daniel Jeffries. Pour le résoudre, il vient de relancer avec, entre autres, Paul Jay, postdoctorant au centre de géogénétique de l'université de Copenhague (Danemark), et Tatiana Giraud, directrice de recherche CNRS à l'université Paris-Saclay — tous deux à l'origine d'un des modèles français —, le projet de recherche Tree of Sex, rassemblant des dizaines de spécialistes à travers le monde. Son but est de collecter toutes les informations publiées sur les systèmes sexuels et les mécanismes de détermination du sexe du vivant.

En attendant les résultats permettant de mettre au jour le mécanisme responsable, une question se pose : la dégénérescence du chromosome Y se poursuit-elle chez les humains ? Car pour Jenny Graves, l'échéance est fixée : il resterait environ 11 millions d'années avant la disparition du chromosome Y chez les humains. En comparant plusieurs espèces de mammifères, la généticienne calcule en effet une perte d'environ cinq gènes par million d'années.

Les 55 gènes restants sont probablement essentiels

Ainsi, les 55 derniers gènes restants du chromosome Y humain auront donc disparu dans 11 millions d'années. Un calcul qui ne fait pas du tout consensus. *« Le problème est que selon cette théorie, la perte de gènes est linéaire. Or, elle est en réalité rapide au début avant de ralentir »*, réagit Nicolas Perrin, professeur honoraire à l'université de Lausanne (Suisse). Les premiers gènes perdus sont des gènes sur lesquels il y a peu de pression de sélection. *« Ceux qui restent sont probablement essentiels, on peut difficilement faire sans »*, confirme Paul Jay.

En particulier, le chromosome Y porte le gène SRY, qui induit la différencia-

DEBORAH CHARLESWORTH

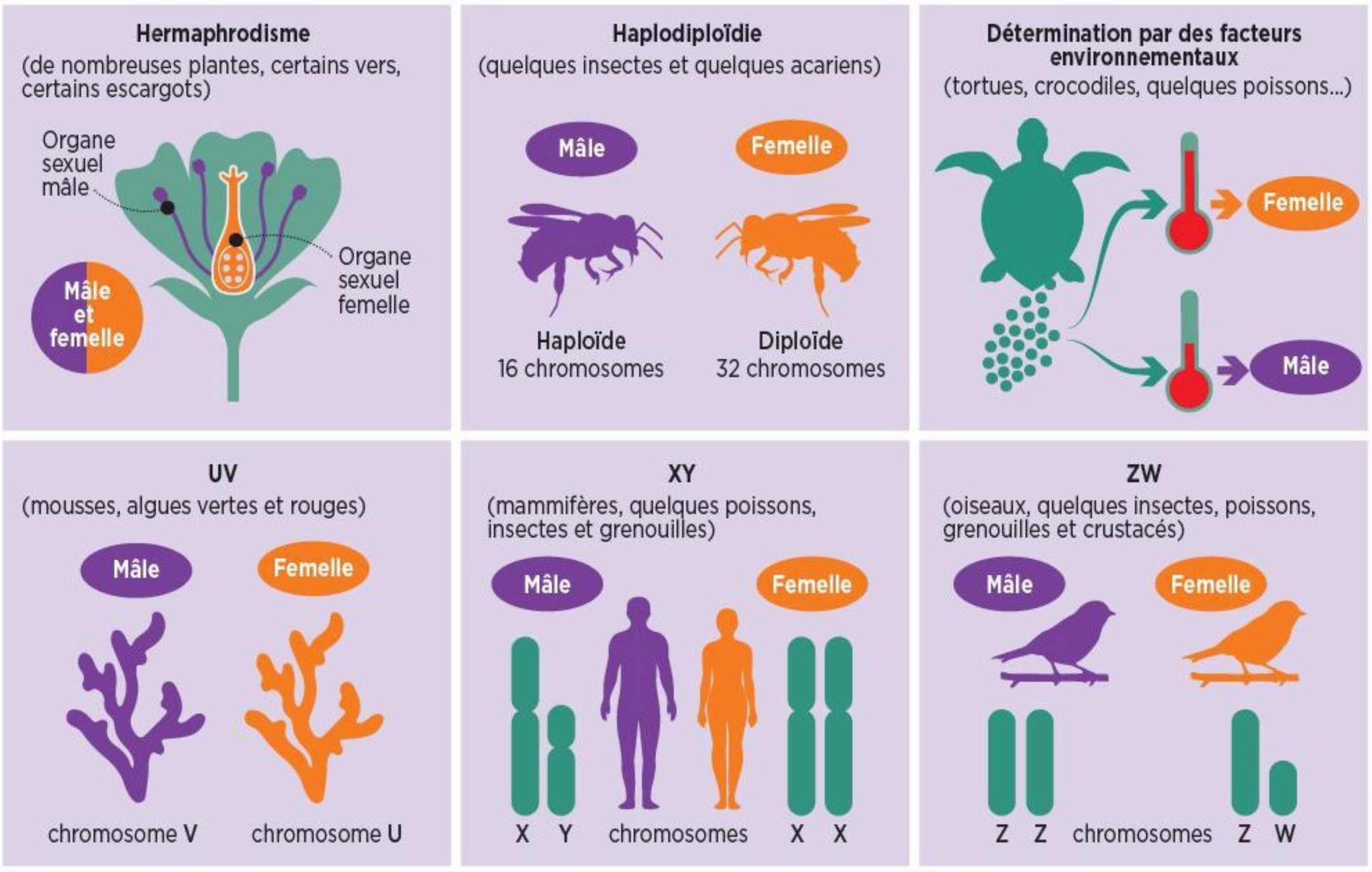
« C'est l'absence de recombinaison entre les chromosomes X et Y qui entraîne la dégénérescence de Y et la perte de gènes »

Deborah Charlesworth, spécialiste de génétique des populations à l'université d'Édimbourg (Écosse)

DÉTERMINATION SEXUELLE

Une grande variété de systèmes chez les espèces vivantes

Si, chez les humains, le sexe est déterminé par les chromosomes X et Y, il existe une multitude de systèmes alternatifs de déterminations du sexe chez d'autres êtres vivants. Parmi les plus classiques : les chromosomes sexuels ZW et UV, l'haplodiploïdie, ou bien la détermination par la température. Mais d'autres encore sont plus particuliers. Chez certains poissons, comme les labres, un mâle dominant est entouré de femelles. Il maintient les autres individus femelles grâce à des *stimuli*. Lorsque le mâle meurt, le plus gros individu femelle devient mâle et prend la tête du harem. Chez les poissons-clowns, c'est l'inverse : une femelle est dominante, et à sa mort le plus gros mâle devient femelle. Chez certains invertébrés marins, si une larve rencontre une femelle, elle va se fixer dessus et se développer en mâle. Mais en absence de femelle, la larve devient femelle. C'est le cas du ver marin *Bonellia viridis*. Parfois, ce sont des parasites qui modifient le sexe d'un individu. Chez la mouche *Sciara coprophila*, certaines femelles ne donnent que des femelles, et d'autres ne donnent que des mâles. « *Les différents systèmes ne sont pas incompatibles,* estime Nicolas Perrin, professeur honoraire à l'université de Lausanne (Suisse). *Parfois il y a un effet génétique et un effet environnemental. Par exemple, le sexe du saurien* Bassiana duperreyi *est déterminé par les chromosomes X et Y. Mais les individus XX se développent en mâle à basse température.* » La question se pose aussi dans le règne végétal. Chez les silènes, des plantes cousines des œillets, si un champignon du genre *Microbotryum* infecte une femelle, il la transforme en mâle.



tion d'un individu en mâle. « *Pour le moment, on ne peut pas se passer du gène SRY. Et tant que ce gène sera sur le chromosome Y, ce dernier ne va pas disparaître* » abonde Thomas Lenormand, directeur de recherche CNRS au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier. Mais « *Y pourrait disparaître rapidement s'il y a une bascule vers un autre système de détermination du sexe* », concède le chercheur. Si disparition du chromosome Y il y a chez l'humain, ce qui demeure peu probable, le scénario le plus plausible serait qu'une autre paire de chromosomes prenne le relais pour devenir à son tour les nouveaux chromosomes sexuels. Or, si l'on s'intéresse plus largement au règne animal, il s'avère que ce *turnover* est très fréquent chez les poissons et les grenouilles. Chez ces dernières, « *le chromosome sexuel mâle dégénère rapidement, ce qui diminue la capacité reproductive ou "fitness" des mâles. N'importe quelle autre mutation déterminant le sexe ailleurs sur le génome va être favorisée* », explique Nicolas Perrin. Les espèces de grenouilles changent ainsi régulièrement de chromosome sexuel. Un phénomène que l'on peut observer en temps réel. Par exemple, chez *Rana japonica*, selon les populations, c'est la paire de chromosome 1 ou 3 qui est responsable du sexe. Mais, chez *Glandirana rugosa*, une autre espèce de grenouille, des populations sont XY et d'autres ZW, un autre mécanisme de détermination du sexe. Des situations encore plus inattendues sont parfois rencontrées *(lire l'encadré p. 65)*. Mais un autre scénario pourrait se présenter chez les humains. Le sexe pourrait être dicté par le nombre de chromosomes X. Ce phénomène a déjà été observé chez certains insectes, comme les drosophiles : si un individu a deux X, il est femelle, s'il n'a qu'un seul X, c'est un mâle.

TONY RINALDO

« Tant que le gène SRY sera sur le chromosome Y, ce dernier ne va pas disparaître »

Thomas Lenormand, directeur de recherche CNRS au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier

Les différences morphologiques contrôlées par les hormones

Soyons clairs : la disparition du Y ne signifiera pas la disparition des mâles. Elle pourrait bien survenir chez l'humain comme elle s'est déjà produite chez d'autres espèces, mais sans jamais remettre en cause la coexistence des deux sexes, ni le dimorphisme sexuel. Chez les grenouilles par exemple, le changement de chromosomes sexuels responsables de la détermination du sexe n'a aucun effet sur le dimorphisme sexuel. Ce dernier est souvent contrôlé par des hormones, et non par la présence de gènes différents sur les chromosomes sexuels. « *L'absence de lien entre la présence ou la structure du chromosome Y et le dimorphisme sexuel reste à prouver formellement. C'est d'ailleurs l'un des objectifs du projet Tree of Sex* » indique Paul Jay. ■

THÉORIE

L'hypothèse du chromosome Y toxique

Cinq ans : c'est le surplus d'espérance de vie des femmes dans le monde par rapport aux hommes. Une situation retrouvée chez la plupart des mammifères. En 2015, une étude publiée dans *Nature* a mis en évidence l'inverse chez les oiseaux : les mâles vivent plus longtemps. Or, chez les oiseaux, le sexe est déterminé par les chromosomes sexuels W et Z, l'exact opposé du système XY. Les oiseaux femelles ont un chromosome W dégénéré. Pour expliquer cette différence de longévité, la généticienne Doris Bachtrog, professeure à l'université de Californie à Berkeley (États-Unis), a proposé une théorie fondée sur les chromosomes sexuels. Du fait de leur dégénérescence, les chromosomes Y et W contiennent beaucoup de transposons : des éléments parasites capables de sauter dans le génome, pouvant créer des mutations dommageables pour les organismes. Ces éléments transposables en surnombre chez les individus porteurs d'un chromosome Y ou W pourraient donc diminuer la longévité. « *Doris Bachtrog a pu étayer cette hypothèse avec des expériences très élégantes chez la drosophile* », indique Gabriel Marais, chercheur à l'université de Porto (Portugal). Les travaux de la scientifique montrent une corrélation entre une longévité plus courte et le fait de posséder un Y dans son génome. Avec des équipes à Lyon, Gabriel Marais réalise des études chez des hommes ayant un chromosome sexuel surnuméraire : ils sont soit XXY, soit XYY. Les travaux ne sont pas encore publiés, mais les premiers résultats semblent conforter l'hypothèse du « Y toxique ».

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

institut Curie
ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

SA0523

Une bactérie géante bouleverse le vivant

Mesurant jusqu'à deux centimètres de long et visible à l'œil nu, la bactérie « Thiomargarita magnifica » repousse les limites de ce qu'on pensait savoir sur les micro-organismes. À l'extérieur comme à l'intérieur, elle présente des caractéristiques inédites. Explications.

Après la virologie, bouleversée au début des années 2000 par la découverte de virus d'une taille jusqu'alors jamais vue *(lire l'encadré ci-contre)*, c'est au tour de la bactériologie de mettre la main sur son premier cas de gigantisme. Décrite dans la revue *Science*, la bactérie *Thiomargarita magnifica* est non seulement la plus grande jamais observée, mais aussi la première à s'extraire du monde microscopique *(voir l'infographie)*. Mesurant jusqu'à deux centimètres de long, elle est visible à l'œil nu et repousse les limites de ce qu'on pensait savoir sur les micro-organismes. « *La première fois que j'ai aperçu ce long filament blanc dans une mangrove de Guadeloupe, j'ai pensé à un organisme filamenteux comme un champignon,* raconte Olivier Gros, responsable de l'équipe Biologie de la mangrove à l'université des Antilles (MNHN/CNRS). *Pourtant, il s'est avéré ne posséder aucun noyau, aucune mitochondrie ou autre organite équipant les organismes complexes que sont les eucaryotes.* »

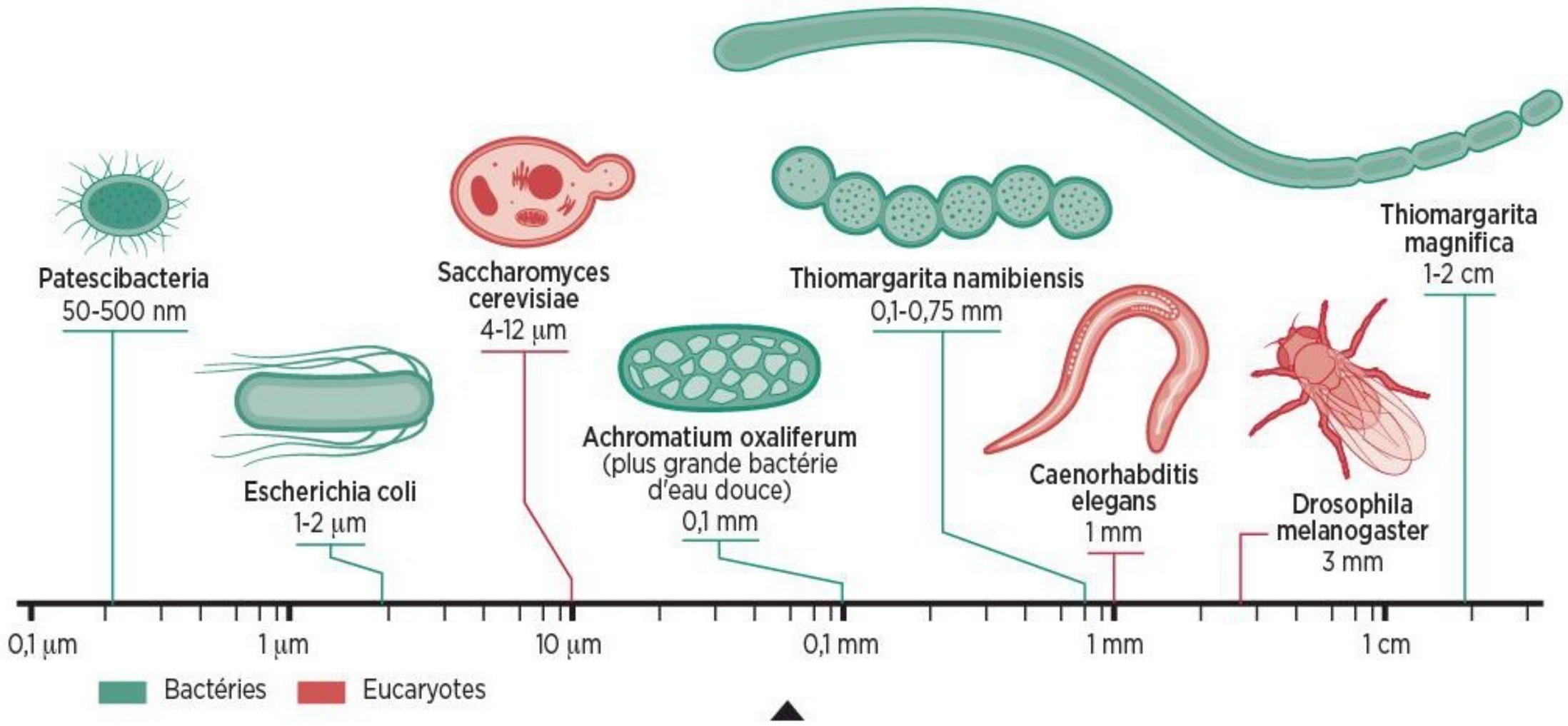
L'autre hypothèse supposait qu'il pouvait s'agir d'un bouquet de bactéries comme on en voit parfois attachées aux feuilles immergées des palétuviers de la mangrove. Mais, là encore, les analyses de microscopie électronique ont démenti cette spéculation. Ce long filament n'était bien constitué que d'une seule cellule et était donc une seule bactérie, géante. Colossale même ! Alors que la majeure partie des bactéries mesurent 2 micromètres de long, *T. magnifica* est près de 5000 fois plus grande. Et même si on la compare aux plus grosses connues jusque-là, également des *Thiomargarita* (comme *Thiomargarita namibiensis*), qui atteignent en moyenne 180 micromètres, *T. magnifica* est 50 fois plus longue que ses cousines avec ses 9000 micromètres.

« T. magnifica » à plusieurs stades de développement. À droite, l'extrémité de la bactérie laisse voir les bourgeonnements d'un nouveau clone.

JEAN-MARIE VOLLAND ET AL.

Un génome copié à près de 700 000 exemplaires

Hors norme, l'organisme l'est également par son contenu. Petit rappel : on a longtemps considéré les cellules procaryotes (bactéries et archées) comme des « sacs à enzymes » où tous les constituants semblaient jetés en vrac sans aucun degré d'organisation. À l'inverse, les cellules des eucaryotes — dont nous faisons partie avec notamment les animaux et les végétaux — ont leurs constituants bien rangés dans différents organites, des structures les séparant les uns des autres, comme l'ADN replié dans le noyau cellulaire. Là encore, *T. magnifica* met un coup de pied magistral dans la fourmilière du vivant, obligeant à réévaluer nos connaissances de base. En effet, l'intérieur de la bactérie est parsemé de petites structures que les chercheurs ont nommées « pépins », de petites vésicules où se déroulent les synthèses protéiques. « *Avec sa taille gigantesque, c'est l'aspect de cette bactérie qui m'a le plus étonné* », témoigne Jean-Marie Volland, le premier auteur de l'étude parue dans



Comparaison de tailles entre des bactéries (procaryotes) et des eucaryotes selon une échelle logarithmique.

Science, alors au Laboratoire national Lawrence-Berkeley (États-Unis). Les deux caractéristiques vont d'ailleurs de pair. Car plus une cellule est grande, plus elle fait face à un problème de diffusion de ses molécules, qui mettent près d'une heure à progresser d'un millimètre. Les cellules eucaryotes ont résolu ce problème en compartimentant leurs fonctions, diminuant ainsi les distances pour accélérer les réactions. À leur façon, les bactéries très grandes comme *Thiomargarita namibiensis* ont trouvé une autre parade, avec une vacuole gigantesque remplie de nitrate et occupant 98 % de son volume. Cette cavité repousse les molécules essentielles contre les parois de la bactérie, les rendant ainsi plus proches. Mais, cela ne suffit pas pour satisfaire aux dimensions exceptionnelles de *T. magnifica*, qui voit son génome copié à près de 700 000 exemplaires, disséminés dans les fameux « pépins ». Selon les chercheurs, ces derniers fonctionnent pratiquement comme des organismes autonomes et contiennent des ribosomes pour transcrire le matériel génétique en ARN, puis en protéines.

Pour l'instant, il demeure compliqué d'étudier ce mastodonte bactérien : *« On parvient à le garder vivant deux à trois jours en laboratoire, puis il meurt,* se désole Olivier Gros. *Nous ne sommes pas encore parvenus à lui trouver un milieu de culture adéquat. De plus, il est plutôt rare dans son milieu naturel : cela fait quatre ou cinq mois que j'en cherche, en vain, dans la mangrove…* » Un vrai handicap pour une bactérie impossible à étudier en profondeur en Guadeloupe et qui doit être expédiée vers des laboratoires sophistiqués comme à Berkeley. *« Nous l'avons soumis aux équipements les plus pointus, comme de la microscopie à rayons X, ici appliquée pour la première fois à une bactérie,* relate Jean-Marie Volland. *Ce qui nous a permis de voir sa structure interne et de décoder son génome. »*

Pourtant, presque tout reste à découvrir. Avec peut-être des perspectives intéressantes pour la santé humaine. En effet, les chercheurs se seraient attendus à ce que la gigantesque surface extérieure offerte par *T. magnifica* soit couverte d'innombrables colonies bactériennes, comme autant de crustacés vivant sur la peau d'une baleine à bosse. Après tout, plus d'un demi-million d'*Escherichia coli* pourraient tenir sur une seule *T. magnifica*… Mais, surprise ! La surface est parfaitement lisse. *« Nous n'en avons pas détecté une seule !* indique Jean-Marie Volland. *Cela est peut-être lié à la capacité de* T. magnifica *de produire des molécules antibiotiques. Plus d'un quart de ses gènes semblent impliqués dans cette activité. »* Face à la pénurie actuelle d'antibiotiques, le chercheur espère donc que cette bactérie hors norme permettra de mettre au point des molécules totalement nouvelles. ■ **Hervé Ratel**

BRUNO BOURGEOIS

IDENTIFICATION

Plus c'est gros, moins on le voit

A priori, aucun point commun entre ***T. magnifica*** et les virus géants découverts (pithovirus, pandoravirus, médusavirus…) depuis une vingtaine d'années. Excepté que si on n'en trouvait pas avant, c'est tout bonnement… qu'on ne les cherchait pas. Le premier virus géant, mimivirus, a ainsi été pris durant dix ans pour une bactérie, avant d'être correctement identifié en 2003. De fait, ces entités sortent des cadres théoriques que les scientifiques avaient érigés. ***Bis repetita*** avec ***T. magnifica***, qui, elle, fit penser à un eucaryote selon les mêmes (faux) préceptes : jamais une bactérie ne peut mesurer une telle taille ! Maintenant que ces barrières ont été franchies, il ne fait guère de doute que d'autres bactéries géantes vont se dévoiler.

GETTY IMAGES

Rétine

Le miroir de notre santé

Cette fine membrane qui tapisse le fond de l'œil est le seul tissu humain qui permette une visualisation directe et non invasive du système nerveux central. Des dispositifs optiques innovants associés à de l'intelligence artificielle offrent désormais la possibilité de détecter des affections neurologiques ou de prévoir le risque de développer une maladie cardio-vasculaire.

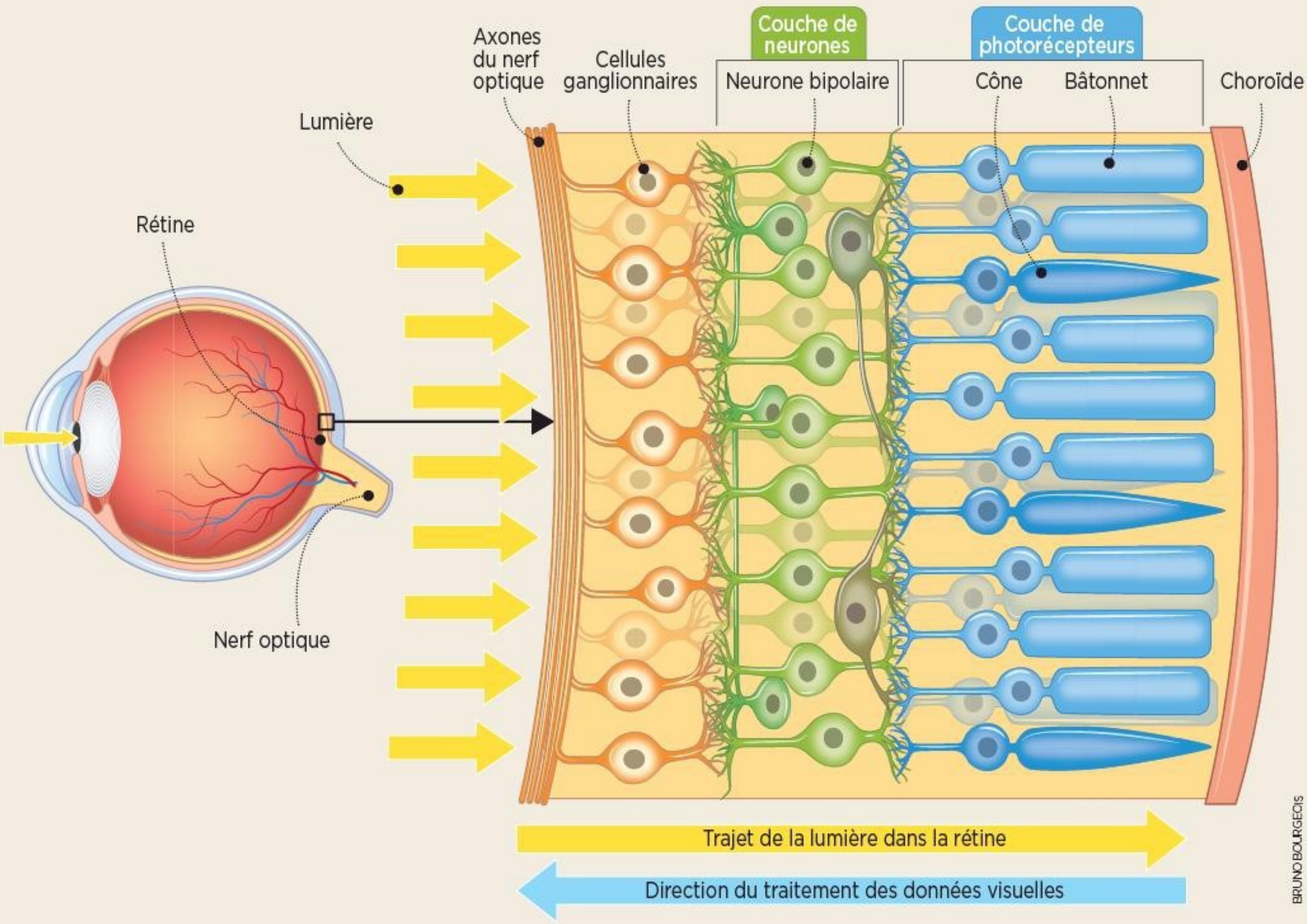
Par Sylvie Riou-Milliot

Pouvoir détecter simplement par un examen indolore de la rétine des affections comme la maladie d'Alzheimer *(voir p. 73)*, des troubles psychiatriques tels que la dépression, la schizophrénie, les troubles bipolaires *(p. 75)*, ou bien encore le risque de développer une maladie cardio-vasculaire *(p. 76)*, souvent plusieurs années avant que la maladie ne s'installe. Un scénario de science-fiction ? Pas du tout. La rétine, cette très fine membrane, est le seul tissu humain qui permette une visualisation directe et non invasive du système nerveux central. Un atout qui fait d'elle une véritable fenêtre ouverte sur le cerveau. « *Retina, window on the brain* » (« La rétine, fenêtre sur le cerveau ») titrait ainsi fin 2021 la revue scientifique *Cell*. C'est que la rétine partage avec le cerveau la même origine embryologique. En clair, ils sont issus des mêmes cellules. Mieux, ils demeurent en lien permanent, par le nerf optique. Par conséquent, aller observer finement et au plus près la structure de la rétine (ses cellules, son épaisseur, sa vascularisation…), mais aussi sa fonction (sa capacité à réagir à la lumière), est un enjeu de taille. Oui, la rétine pourrait à l'avenir constituer la parfaite vigie de notre état de santé. Pour preuve, de nombreux travaux de recherche en cours qui, tous, témoignent d'un énorme potentiel, pas seulement comme « *miroir de l'âme* », selon l'expression consa- ▸

STRUCTURE RÉTINIENNE

Une interface entre l'extérieur et le cerveau

Sensible à la lumière et mesurant moins de 500 micromètres d'épaisseur, la rétine tapisse l'intérieur de l'œil. C'est ici que les messages lumineux venant de l'extérieur sont traduits en signaux nerveux, électriques et chimiques, envoyés au cerveau. Organisée en un tissu complexe — une dizaine de couches de cellules —, elle contient entre autres les photorécepteurs, les bâtonnets et les cônes. Les premiers sont situés surtout en périphérie, les seconds au centre même de la rétine, la macula, une zone de 5,5 millimètres de diamètre, très précisément là où l'acuité visuelle est maximale et où débutent les phénomènes de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), une affection dont la fréquence augmente avec le temps (1 % des plus de 50 ans, 25 % des plus de 75 ans). Fin 2021, un nouveau type cellulaire en forme de cloche jusque-là inconnu, a été identifié par des scientifiques américains de l'université d'Utah. Les premiers travaux ont démontré qu'en cas de stimulation lumineuse, ces « cellules de Campana » restaient actives beaucoup plus longtemps que les autres photorécepteurs. Une particularité peut-être liée à leur implication dans les processus de mémorisation.



Mince membrane recouvrant l'intérieur du globe oculaire, la rétine est constituée de cellules photoréceptrices (cônes et bâtonnets), qui captent la lumière, et de cellules nerveuses, qui transmettent l'information au cerveau.

crée, mais aussi du corps. Pas un jour sans que des travaux ne paraissent sur le sujet. Dans une étude publiée mi-mars dans la revue *Acta neuropathologica*, des chercheurs américains impliqués de longue date dans cette voie encore balbutiante ont ainsi produit l'analyse la plus approfondie à ce jour des modifications rétiniennes — des dépôts de protéine amyloïde dans les cellules reliées au nerf optique — chez des malades d'Alzheimer. Des travaux à rapprocher de ceux d'une start-up québécoise qui prévoit de diagnostiquer la démence grâce à une caméra sophistiquée (*voir l'illustration p. 74)*. Un pas de plus vers l'ultraprécision.

Des techniques intervenant au micromètre près

L'idée d'observer la rétine pour avoir une image de la santé du corps remonte à un peu moins de 200 ans. C'est l'invention en 1851 de l'ophtalmoscope, l'ancien nom du fond d'œil *(lire l'encadré p. 77)*, qui a permis d'explorer toutes les structures de l'œil situées à l'arrière de la pupille. Mais désormais, tout se joue à quelques micromètres. C'est le cas d'un nouveau mode d'éclairage qui devrait permettre de diagnostiquer à l'avenir encore plus précocement la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) pour la traiter avec plus d'efficacité. « *Au lieu de passer par le centre de l'œil, l'illumination se fait par les côtés, à travers la sclérotique, le blanc de l'œil, ce qui permet de visualiser des cellules jusque-là invisibles, exactement là ou démarre la DMLA* », signale Francine Behar-Cohen, professeure à l'hôpital Cochin à Paris, qui a participé aux travaux en cours lancés à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) avec la start-up Earlysight. D'autres outils se sont développés, comme l'angiographie appliquée à la tomographie par cohérence optique (OCTA), un scanner rétinien par infrarouge capable d'atteindre les vaisseaux les plus fins, comme les capillaires rétiniens, pour obtenir des couches fines de la rétine ou du nerf optique. Non seulement les techniques ne cessent de s'affiner, mais elles se combinent désormais à des programmes d'apprentissage profond (*deep learning*) d'intelligence artificielle (IA) de plus en plus puissants, rapides et performants. Dans un récent bulletin publié en 2022 par l'Académie américaine d'ophtalmologie, le Dr Pearse Andrew Keane, de l'University College de Londres (Royaume-Uni), ophtalmologiste internationalement reconnu et spécialiste d'IA, résumait ainsi le bond technologique : « *J'ai passé les vingt dernières années à regarder de manière obsessionnelle des photographies rétiniennes et je ne peux pas dire s'il s'agit du fond d'œil d'un homme ou d'une femme. Or, l'IA peut déterminer le sexe, l'âge, le poids et même savoir si cette personne fume.* » La traque aux millions d'informations cachées au sein des images rétiniennes ne fait que démarrer. ■

P. A. KEANE

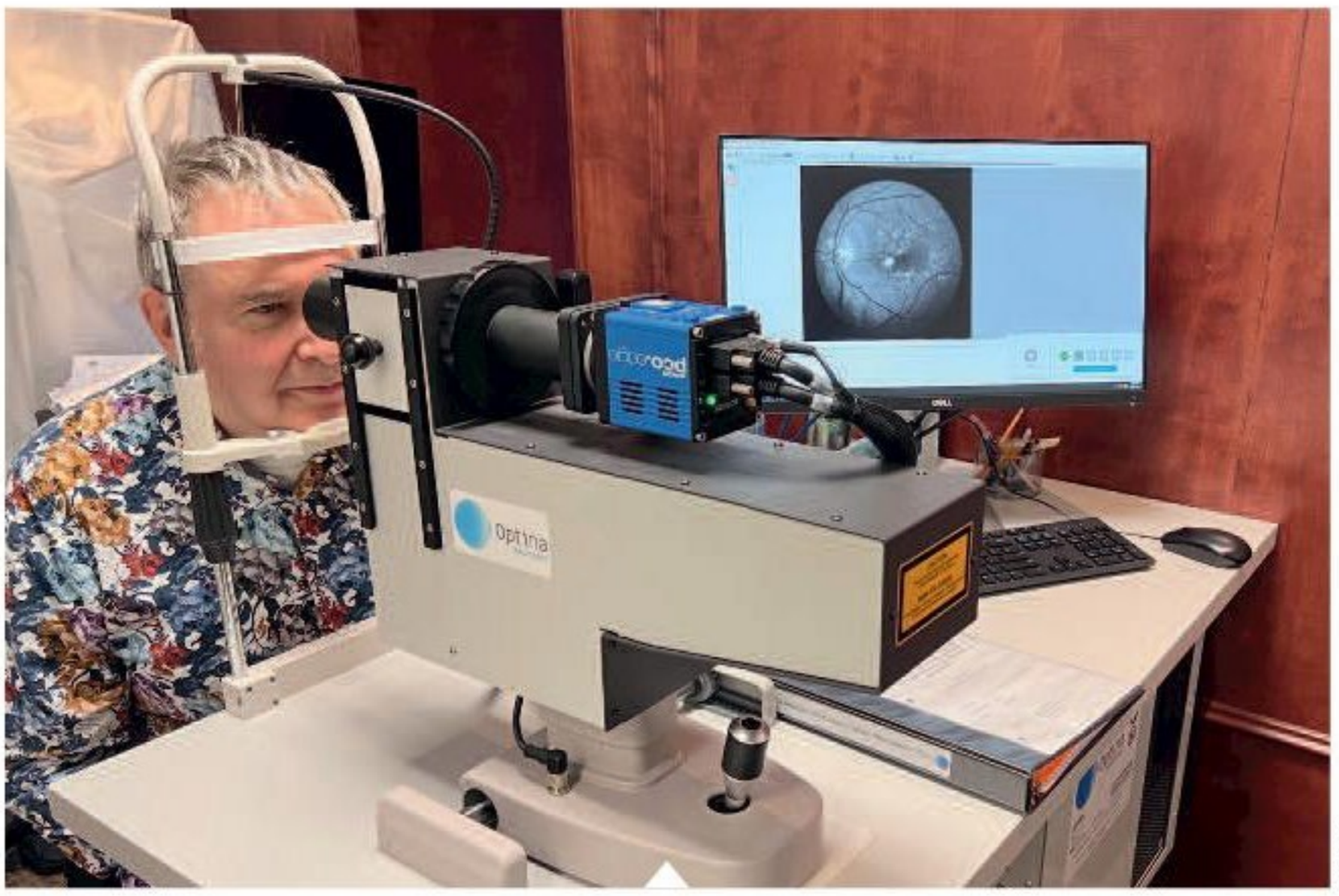
« À partir d'une image rétinienne, l'IA peut déterminer le sexe, l'âge et le poids d'une personne »

Pearse Andrew Keane, ophtalmologiste à l'University College de Londres (Royaume-Uni)

NEUROLOGIE

PRÉDIRE LE RISQUE DE DÉVELOPPER ALZHEIMER

Voir plus loin que l'œil humain pour prédire le risque de développer une maladie d'Alzheimer. Tel est le *credo* de chercheurs québécois de la start-up Optina à Montréal (Canada). « *Fixez bien le point lumineux, ne bougez plus, ne clignez pas, c'est fini.* » Simple, efficace, rapide, la procédure se déroule en quelques secondes devant un dispositif semblable à ceux que l'on trouve chez les ophtalmologistes. En pratique, un bref flash lumineux de quelques secondes pour explorer l'ensemble de la rétine et obtenir des millions de pixels grâce à une caméra ▶



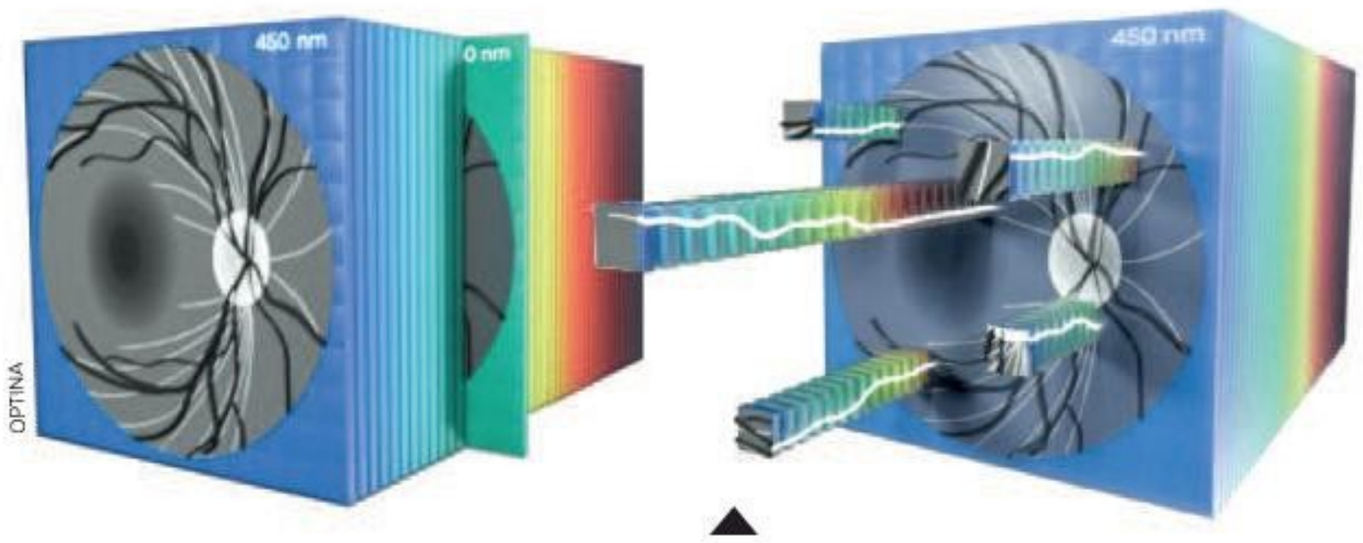
OPTINA

Couplée à un algorithme d'intelligence artificielle, la caméra d'Optina pourrait détecter des biomarqueurs, signes avant-coureurs d'Alzheimer.

CAMÉRA HYPERSPECTRALE

Un test rapide et non invasif

La caméra dite hyperspectrale (CHS) développée par Optina (Québec, Canada) capte et traite l'intensité de la lumière réfléchie par la lumière à raison de 92 images par seconde, « *une vitesse jamais égalée à ce jour, source d'une très grande précision* », indique le Dr Jean Daniel Arbour, co-inventeur. En quelques secondes seulement, l'obtention des clichés s'effectue selon 90 longueurs d'onde au lieu de trois (bleu, vert, rouge) avec les outils classiques. Puis, les images sont empilées et superposées pour former un « cube » dit hyperspectral, chacun contenant des millions de pixels.



OPTINA

Des images rétiniennes sont prises à différentes longueurs d'onde puis un spectre optique est extrait pour chacun des pixels de l'image, qui peut alors permettre d'identifier des biomarqueurs de certaines maladies.

très spéciale (*lire l'encadré ci-dessus)* tout spécialement créée au Québec. Objectif : parvenir, avec un algorithme d'intelligence artificielle (IA) associé à l'optique, à déterminer la probabilité d'une démence débutante et ensuite permettre à ceux qui le souhaitent de participer à des essais cliniques évaluant des molécules en cours de test afin d'agir au stade précoce de la maladie. Pour rappel, la maladie d'Alzheimer concerne 55 millions de personnes dans le monde, selon l'Organisation mondiale de la santé. Elles seront 139 millions en 2050. « *En 2023, la maladie reste incurable mais les molécules les plus récentes laissent entrevoir la possibilité de la ralentir. Or, l'admissibilité des patients aux nouveaux traitements nécessite la détection des plaques amyloïdes par tomographie par émission de positons (TEP)* », rappelle David Lapointe, directeur d'Optina. Il poursuit : « *Il s'agit d'un examen coûteux qui ne peut être proposé à grande échelle. Notre dispositif, combinant optique et IA, pourrait permettre d'éviter la TEP à une grande partie de la population à risque et rendre accessible le dépistage précoce.* »

Retour en arrière. Tout a commencé en 2008 avec la rencontre à Montréal entre un astrophysicien, Sébastien Blais-Ouellette, et un ophtalmologiste, le Dr Jean Daniel Arbour. Ces deux mordus d'optique se mettent à échanger sur les étoiles, la lumière, l'infiniment petit. Puis ils imaginent des applications plus médicales. Comme le dépistage de maladies ophtalmiques, la DMLA. Mais très vite se profile une idée : appliquer leur imagerie ultra-précise au dépistage précoce d'affections neurodégénératives. Et ce, en raison des liens intimes existant entre rétine et cerveau, mais aussi parce que le potentiel d'une approche diagnostique oculaire non invasive fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Ils sont menés chez l'animal comme chez des malades d'Alzheimer dès les années 2000 : différentes équipes internationales ont recours par exemple à la tomographie par cohérence optique (OCT), un principe proche de celui du scanner utilisant un rayonnement infrarouge au lieu de rayons X. Résultat : la liste de biomarqueurs diagnostics rétiniens proposés s'allonge régulièrement : amincissement des différentes couches cellulaires, anomalies de la microvascularisation, moindre épaisseur du nerf rétinien…

La capacité à filmer le métabolisme de l'œil

D'où la démarche d'Optina, attachée à tester dans ce domaine sa propre caméra. Les résultats démontrent que cette imagerie hyperspectrale est capable de retrouver des différences significatives entre des sujets présentant un déclin cognitif et des dépôts de plaques amyloïdes, et ceux qui ne présentent pas de plaques. « *Nous ne prétendons pas détecter les dépôts amyloïdes au niveau de la rétine,* insiste Shannon Campbell, vice-présidente et responsable des affaires cliniques et médicales chez Optina. *Ce que nous cherchons à mettre en évidence, ce sont les très fines variations spatiales et spectrales dans les images rétiniennes corrélées avec la présence ou pas des plaques. Nous avons réussi à établir une grande correspondance entre les images obtenues par notre caméra et l'imagerie traditionnelle par Pet-scan.* »

La start-up poursuit ses travaux et peut compter sur une trentaine de collaborateurs : ingénieurs, biomathématiciens, spécialistes de l'IA. « *Notre outil a le potentiel de filmer le métabolisme de l'œil*

OPTINA

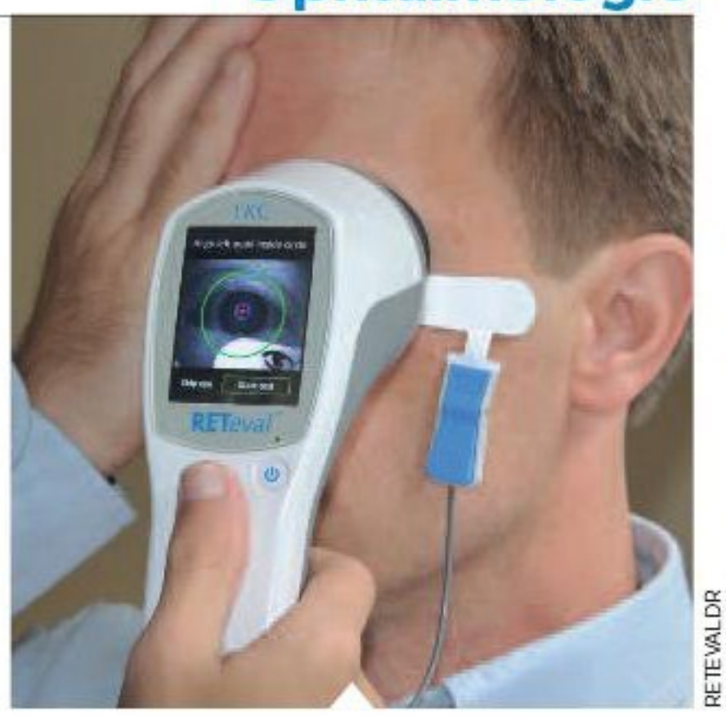
« Nous avons obtenu une correspondance de 85 % avec l'imagerie traditionnelle »

Shannon Campbell, vice-présidente et responsable des affaires cliniques et médicales d'Optina à Montréal (Canada)

et pas seulement sa structure, comme le font les appareils actuels de diagnostic », précise Jean Daniel Arbour. Les cubes d'images obtenus et leurs millions de pixels sont traités par un programme d'analyse spécifique dit awAIR qui « *permet de détecter par exemple des changements subtils de composition moléculaire et d'arrangement cellulaire, invisibles à l'œil nu* », détaille Claudia Chevrefils, responsable du service informatique chez Optina. La technologie a reçu en 2019 la distinction de « Breakthrough device » (dispositif disruptif) décernée par l'autorité américaine des médicaments, la Food and Drug Administration (FDA). Une étape importante vers l'homologation de travaux, permettant d'accélérer le passage aux essais cliniques.

Des essais qui se multiplient à travers le monde

Aujourd'hui, plus de 1000 patients ont été inclus dans une douzaine de sites à travers le monde, surtout au Canada et aux États-Unis, mais aussi aux Pays-Bas et au Brésil, et d'autres essais doivent démarrer cet été. C'est le cas à Ottawa (Canada), à la clinique de la mémoire de l'Outaouais dirigée par le Dr Richard Bergeron. Dans ce lieu déjà orienté à 100 % sur la mémoire et consacré à la recherche clinique tous azimuts, une pièce spéciale sera entièrement dédiée à la caméra qui doit y être installée sous peu. Ici, toute personne entre 50 et 85 ans qui désire passer un bilan mémoire est la bienvenue. « *Le mode de recrutement se partage entre le bouche-à-oreille et les recommandations des médecins* », détaille Marielle Thibeault, l'une des membres de l'équipe. *Tout y est gratuit et pris en charge à 100 %.* » Des facilités dues au financement de la structure par les principaux laboratoires impliqués dans la mise au point des molécules en développement. Mais la neurologie n'est pas le seul domaine exploré par Optina. À l'Institut de cardiologie de Montréal (ICM), un autre essai, Eye to heart Connection (connexion de de l'œil au cœur), a démarré. Plusieurs centaines de patients sont en cours d'inclusion. Piloté par le Dr Jean-Claude Tardif, directeur du centre de recherche de l'ICM, il est réservé aux patients suivis en cardiologie. Il va vérifier si une signature rétinienne spécifique peut être associée au risque cardiaque. « *L'approche est très séduisante mais reste à confirmer* », signale le spécialiste. Mêmes espoirs chez Patricia Sorya, l'optométriste qui a commencé les tests auprès des patients : « *Imaginez que pour contempler un beau paysage, vous ayez le choix entre une fenêtre couverte de givre et une autre totalement ouverte, laquelle vous choisiriez ?* » ■



RETEVALDR

L'analyse des tracés du signal électrique rétinien déclenché par l'électrorétinographe pourrait établir un éventuel risque de développer une maladie mentale.

PSYCHIATRIE

UN DIAGNOSTIC DE TROUBLES BIPOLAIRES OU DE DÉPRESSION

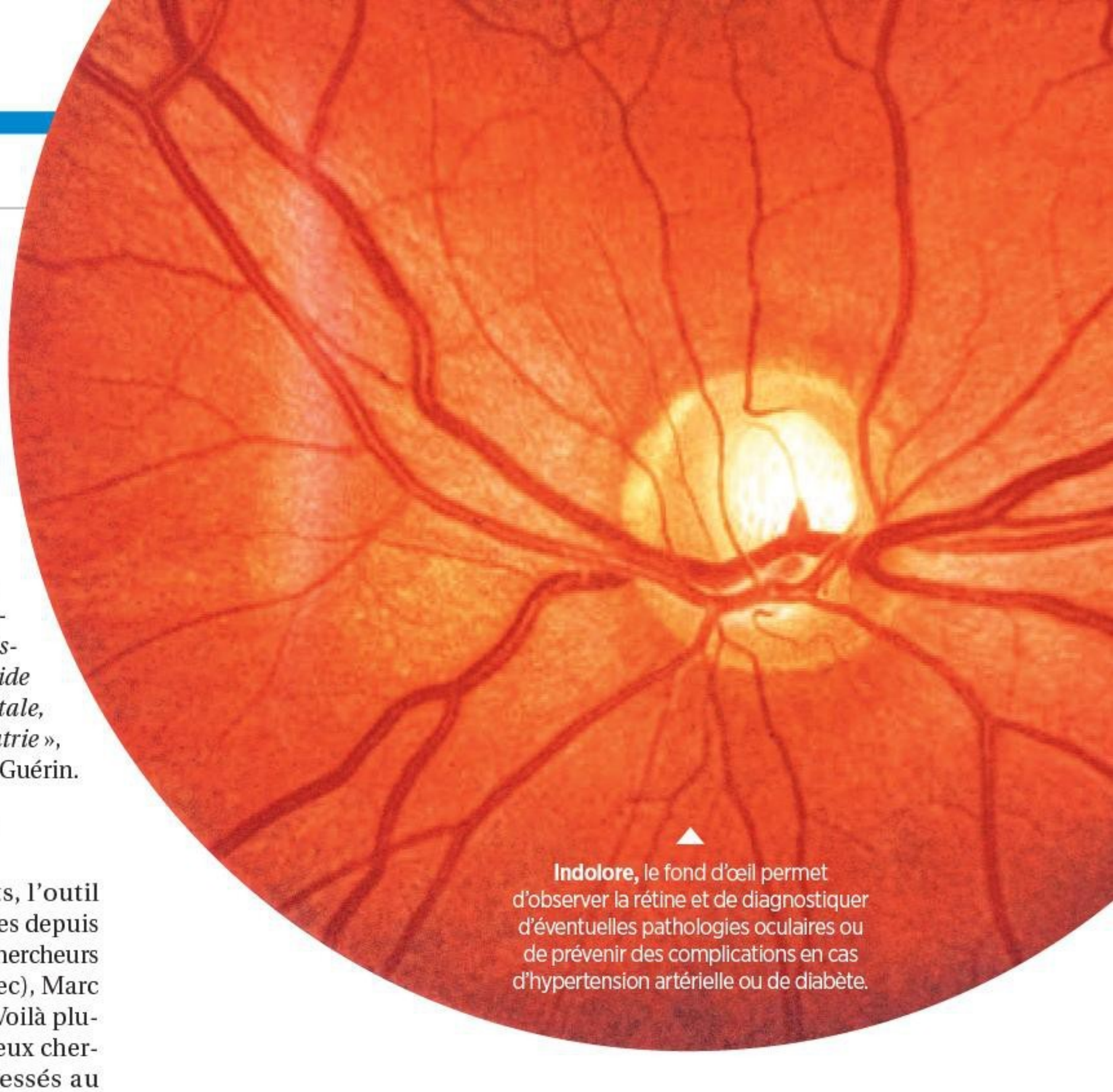
Et si, au lieu de discuter avec votre psychiatre, celui-ci vous proposait d'examiner votre rétine ? Le voilà qui disposerait alors devant votre œil un électrorétinographe portable en vous demandant simplement de regarder la lumière envoyée par l'appareil. Quand votre résultat, l'électrorétinogramme (ERG) *(lire ci-dessous)*, serait disponible, vous reverriez votre psychiatre et en sauriez plus sur votre risque éventuel de développer un trouble psychiatrique. Un scénario encore hypothétique car il n'existe pas pour l'instant de biomarqueur rétinien validé ainsi utilisable. Mais certains travaux de recherche sont déjà bien avancés, comme ceux de la start-up québécoise diaMentis. Son objectif à cinq ans est ambitieux : diagnostiquer les troubles bipolaires, la schizophrénie ou encore la dépression en moins de douze heures, soit bien plus précocement qu'aujourd'hui, où le délai moyen de diagnostic est estimé entre cinq et sept ans. Comment ? En analysant les réponses cette fois électriques de la rétine aux signaux lumineux. « *La psychiatrie est la seule spécialité médicale qui ne dispose à ce jour d'aucun examen d'analyse objectif* », observe ▸

ÉLECTRORÉTINOGRAMME

Mesurer la réponse électrique de la rétine

Trois lettres, ERG, pour électrorétinogramme, l'équivalent ophtalmologique du dispositif utilisé en cardiologie, l'électrocardiogramme (ECG). L'examen est réalisé par un électrorétinographe qui envoie un flash lumineux et mesure le signal électrique émis par les cellules rétiniennes ainsi stimulées, principalement les cônes et les bâtonnets. Il en existe différents types (dits flash, multifocal, pattern), certains étant même portables. Cet examen de physiologie rétinienne se déroule en position assise dans l'obscurité ou en semi-pénombre selon les types d'appareils utilisés. Il nécessite des électrodes positionnées directement sur la peau ou le globe oculaire, avec dans ce cas le recours à des lentilles spéciales. Comme avec l'ECG, le résultat obtenu est un tracé, la succession de deux ondes, l'activité électrique des photorécepteurs, dont la vitesse et l'amplitude peuvent être analysées.

le Dr Marc Guérin, l'un des fondateurs de la start-up. Résultat : les diagnostics sont établis uniquement à partir d'observations et de symptômes cliniques, et souvent de manière tardive. Une situation qui dessert souvent les patients et que la start-up créée en 2015 souhaite faire évoluer. « *Notre dispositif sera le premier outil d'aide au diagnostic en santé mentale, il va tout changer en psychiatrie* », poursuit, enthousiaste, Marc Guérin.



Indolore, le fond d'œil permet d'observer la rétine et de diagnostiquer d'éventuelles pathologies oculaires ou de prévenir des complications en cas d'hypertension artérielle ou de diabète.

DOCSTOCK/K AGE / BSIP

Établir une biosignature spécifique

Toujours en phase de tests, l'outil repose sur des études menées depuis plus de quinze ans par deux chercheurs de l'université Laval (Québec), Marc Hébert et Michel Maziade. Voilà plusieurs décennies que ces deux chercheurs se sont, eux, intéressés au diagnostic rétinien des maladies psychiatriques, la voie ayant été ouverte par des travaux hongrois pionniers dès la fin des années 1980. « *Aujourd'hui, il est bien établi que la rétine est un site pertinent d'analyse de la physiopathologie des troubles psychiatriques* », estime Claude Hariton, responsable scientifique chez diaMentis.

Des essais comparant des ERG de volontaires à ceux de patients suivis en psychiatrie ont en effet retrouvé plusieurs différences dans l'analyse des tracés du signal électrique rétinien : un ralentissement, une moindre amplitude, ainsi qu'un amincissement des couches cellulaires. Afin de parvenir à mieux discriminer les résultats en fonction de chacune des différentes pathologies (bipolarité, dépression, schizophrénie) et « *pour établir une biosignature spécifique, nous avons déposé différents brevets et développé une technologie d'intelligence artificielle, Retinal Signal Processing and Analysis (RSPA)* », détaille Claude Hariton. Des travaux qui, là aussi, ont obtenu fin 2020 la dénomination « Breakthrough device » décernée par la FDA. « *L'objectif à terme est de pouvoir donner au médecin et au patient un pourcentage du risque de développer tel ou tel trouble psychiatrique* », indique Claude Horeton. Afin d'entraîner au mieux l'algorithme, des essais cliniques sur environ 300 patients ont été lancés dans une quinzaine de centres au Canada et aux États-Unis. Comme avec l'université de Rochester (État de New York), dans un centre entièrement consacré à la recherche sur la rétine et le cerveau, le Center for RétinA and Brain (CRAB) dirigé par le Dr Steven Silverstein, signataire de nombreuses études dans ce domaine.

De ce côté-ci de l'Atlantique aussi, les liens entre rétine et psychiatrie intriguent. C'est le cas à l'université de Nancy, qui a lancé fin 2022 l'étude BiMAR. « *Deux groupes sont en formation* », précise son coordonnateur, le Dr Thomas Schwitzer. L'un sera composé de 70 patients bipolaires, l'autre de 70 volontaires. Dans les deux groupes, un dispositif médical portable dit Retinaute, développé par une start-up française, BioSerenity, sera utilisé. « *Il se présente sous la forme d'un casque de réalité virtuelle, utilisable en ambulatoire,* détaille Thomas Schwitzer. *Il utilise des électrodes cutanées pour la collecte des paramètres et permettra d'effectuer des ERG couplés à des électroencéphalogrammes*

DIAMENTIS

« La rétine est un site pertinent d'analyse de la physiopathologie des troubles psychiatriques »

Claude Hariton, vice-président et responsable scientifique de la start-up diaMentis à Québec (Canada)

DÉPISTAGE

Le fond d'œil, un examen aussi simple que puissant

Le fond d'œil (FO) explore les structures de l'œil situées à l'arrière du cristallin. Il est réalisé en routine par un ophtalmologiste et peut aussi être prescrit par un diabétologue ou un cardiologue. Il sert aujourd'hui surtout à dépister certaines atteintes oculaires (une rétinopathie diabétique, une complication du diabète, une dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), une hypertension artérielle...) et à suivre leur évolution. Totalement indolore, il nécessite que les pupilles soient préalablement dilatées avec un collyre. Deux techniques existent : le fond d'œil par ophtalmoscopie indirecte et celui par biomicroscopie (lampe à fente). L'examinateur regarde la « papille », le lieu d'insertion du nerf optique, et les vaisseaux de la rétine, les artères. Normalement fines et brillantes, leurs parois, en cas de pathologie, réfléchissent différemment la lumière et leur aspect est alors modifié. D'autres appareils, des rétinographes, permettent quant à eux de prendre des photos et ce, sans dilatation.

(EEG). » Ici, l'objectif est de parvenir à dépister simplement de manière plus précoce les troubles bipolaires en les distinguant d'une dépression. Car si les symptômes sont parfois proches, les deux pathologies relèvent d'un traitement très différent Soit un net bénéfice pour le patient qui pourrait accéder plus vite à un traitement personnalisé. De la rétine donc comme approche pour une psychiatrie de précision. ■

CARDIOLOGIE

L'ÂGE RÉTINIEN RENSEIGNE SUR LA SANTÉ CARDIO-VASCULAIRE

Avoir l'âge de ses artères mais aussi celui de sa rétine. Tel est en résumé le résultat d'une étude internationale publiée en 2022 dans le *British Journal of Ophthalmology*. Elle s'est intéressée au lien entre l'âge dit rétinien, celui calculé par un algorithme en fonction de l'aspect au fond d'œil *(lire l'encadré ci-dessus)* des artères irriguant la rétine, avec le risque de mortalité. En recourant à une puissante IA appliquée sur près de 47 000 images de fond d'œil, les chercheurs ont démontré que cet âge rétinien constitue un robuste biomarqueur du vieillissement, très étroitement lié au risque de décès. Mais attention, cette étude ne prétend pas prédire exactement le temps qu'il reste à vivre! Elle démontre que *« si l'âge rétinien calculé par l'algorithme est supérieur de plus d'un an à l'âge réel de la personne, le risque de décès, quelle qu'en soit la cause, au cours des onze années suivantes, augmente de 2 %. »*

D'autres travaux ont, eux, comparé des fonds d'œil de volontaires à ceux réalisés chez des patients suivis pour des maladies cardio-vasculaires. Ainsi, une étude parue l'hiver dernier dans *Nature Machine Intelligence* détaille les performances d'un algorithme visant à identifier les personnes risquant de présenter un infarctus du myocarde au cours de l'année suivant l'examen oculaire. Cette fois, l'équipe de Pr Alejandro Frangi (université de Leeds, Royaume-Uni), constituée de cardiologues, de bio-ingénieurs et de mathématiciens, a réussi à mettre en lien les anomalies retrouvées au fond d'œil avec la taille et l'efficacité des cavités ventriculaires, des données calculées lors de la réalisation d'échographies, reflet de la fonction cardiaque. Ces travaux menés sur 5000 participants ont démontré que l'algorithme était capable d'indiquer un risque élevé d'infarctus du myocarde, avec une précision comprise entre 70 % et 80 %. *« Cette technique ouvre la possibilité de révolutionner le dépistage des maladies cardiaques, qui restent la principale cause de décès prématuré dans le monde »*, précisait alors l'université. En effet, les avantages d'une telle approche sont nombreux: rapidité, simplicité et facilité à poser le diagnostic tant pour le médecin que pour le patient.

Vers une extension pour les maladies rénales

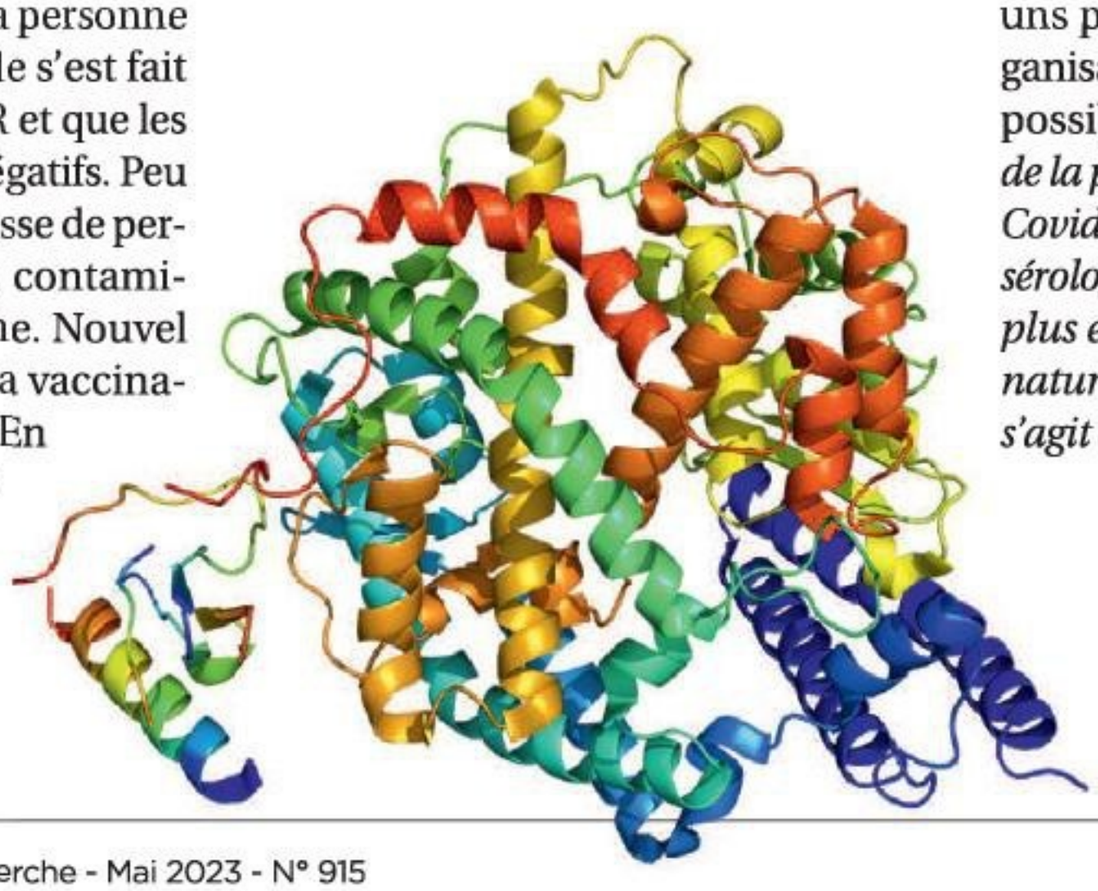
Encore plus récemment, c'est un autre travail mené par une start-up coréenne, Mediwhale, qui a reçu le prix d'innovation CES 2023 pour l'un de ses produits de santé numérique, Reti-CVD. Différentes publications ces dernières années avaient déjà montré son intérêt pour évaluer le risque cardio-vasculaire d'un patient. Là encore, la précision et la fiabilité de Reti-CVD devraient permettre à la start-up de viser une entrée d'abord sur le marché américain, une fois le feu vert de la FDA obtenu. Très présente ces derniers mois dans les congrès les plus prestigieux (American Heart Association, American Society of Nephrology), Mediwhale prévoit déjà d'étendre les possibilités de son outil diagnostic aux maladies rénales. Petit bémol commun à ces différents travaux d'IA : leurs résultats ne valent que pour chaque algorithme testé et restent intimement liés aux méthodes de calcul propres à chaque équipe, chacun se prévalant de bons résultats. Et les études comparatives s'avèrent complexes, voire impossibles à réaliser. ■

Le mystère des « jamais covidés »

Certaines personnes ont-elles totalement échappé au Covid-19 ? Plusieurs équipes ont lancé des projets de recherche pour essayer d'identifier une résistance naturelle au virus.

On les appelle les « jamais covidés », ceux qui n'ont jamais eu le Covid-19, en tout cas jusqu'à preuve du contraire. Personnel de santé au contact de malades, simples citoyens dont le test PCR n'est jamais devenu positif malgré la présence d'un conjoint ou d'un membre de la famille malade dans le foyer. Plusieurs équipes à travers le monde ont lancé des projets de recherche pour essayer de comprendre si ces personnes n'ont vraiment jamais été infectées par le Sras-CoV-2. Mission quasi impossible, compte tenu des difficultés pour prouver qu'un volontaire a bien été exposé au virus, au contact de personnes malades qui disséminaient leurs germes. En parallèle, la personne doit pouvoir prouver qu'elle s'est fait tester plusieurs fois par PCR et que les résultats ont toujours été négatifs. Peu probable, *a priori*, qu'il s'agisse de personnes asymptomatiques, contaminées sans aucun symptôme. Nouvel obstacle sur ce parcours : la vaccination, qui brouille les pistes. En effet, les personnes vaccinées produisent des anticorps spécifiques contre le Sras-CoV-2, qui se confondent avec leur potentielle immunité initiale.

C'est pourtant la tâche à laquelle le Pr Jean-Laurent Casanova a décidé de se mesurer. Le généticien, chef d'équipe à l'institut Imagine en France et du Covid Human Genetic Effort, un groupe de recherche à l'université Rockefeller à New York (États-Unis), a lancé une vaste campagne de recrutement par l'intermédiaire d'une quarantaine de centres à travers le monde. « *Nous recherchons des personnes exposées au Covid-19 en 2020, voire début 2021, avant qu'elles ne soient vaccinées,* explique-t-il. *Nous avons reçu plus de 10 000 réponses de personnes du monde entier, dont 5000 avec un questionnaire correctement rempli. Entre 1000 et 2000 personnes ont été retenues et ont reçu par la poste un kit de prélèvement de salive.* » Les échantillons, renvoyés au laboratoire, vont être séquencés afin de comparer les génomes des personnes qui se disent résistantes au Covid-19 à ceux de personnes qui ont bien été malades. Quand on lui demande quelles parties du génome seront particulièrement scrutées, le chercheur reste ouvert à toutes les éventualités. Le gène est-il présent sur un seul chromosome (dominant) — ce qui implique qu'il ne vient que d'un seul parent — ou sur les deux (récessif) ? La mutation est-elle monogénique et n'affecte-t-elle donc qu'un seul gène? S'agit-il d'un gène homéotique, c'est-à-dire qu'il détermine la place des organes les uns par rapport aux autres dans l'organisation d'un être vivant? Autant de possibilités à explorer. « *Jusqu'à 97 % de la population a pu être infectée par le Covid-19, comme le montrent les études sérologiques. Avec la vaccination, il est de plus en plus difficile de savoir si on est naturellement résistant au virus ou s'il s'agit d'autres raisons. Les "jamais covi-*



◀ **La protéine ACE2** a été identifiée comme la « porte d'entrée » du Sras-CoV-2 dans l'organisme.

PROTEINDATABANK

VOISIN/PHANIE

Une minorité de personnes massivement exposées au Sras-CoV-2 se retrouvent avec des tests toujours négatifs. De quoi intriguer les chercheurs qui tentent de comprendre si elles n'ont réellement jamais été infectées par le virus.

dés" sont désormais une population très limitée, qui ne fait que rétrécir », commente le Pr Olivier Schwartz, directeur de l'unité Virus et immunité à l'Institut Pasteur, à Paris.

Une piste génétique plus complexe qu'il n'y paraît

La résistance naturelle à un virus est rare, mais le phénomène a déjà été constaté dans d'autres maladies, comme le sida. Pour infecter l'organisme, le VIH se sert d'une petite molécule appelée CCR5 à la surface des cellules. Une sorte de porte d'entrée par laquelle il peut passer pour se répandre dans le reste du corps. Sans ce récepteur CCR5, le virus reste à la surface et ne peut pas pénétrer les cellules. Une équipe de chercheurs a ainsi pu démontrer que certaines personnes dans le monde sont complètement résistantes au VIH.

Dès le début de la pandémie, les chercheurs ont identifié la « porte d'entrée » du Sras-CoV-2, le récepteur ACE2, équivalent du CCR5 pour le VIH. Suffirait-il — encore une fois à cause d'une mutation — de ne pas avoir de récepteur ACE2 pour être totalement imperméable au Sras-CoV-2 ? Les choses sont plus complexes que cela. Le récepteur ACE2 *« est impliqué dans la régulation de certaines fonctions cardio-vasculaires, pulmonaires et rénales. Il est notamment situé au cœur d'un mécanisme de régulation de la pression artérielle* », explique Olivier Schwartz. ACE2 joue le rôle de balance dans la vasoconstriction et la vasodilatation, c'est-à-dire la capacité des vaisseaux à se dilater et à se contracter. *« Les personnes qui ne possèdent pas le récepteur CCR5, et qui ne peuvent donc pas être contaminées par le VIH, sont parfaitement saines. En revanche, quelqu'un à qui il manque le récepteur ACE2 sera vraiment très malade et ne passera pas inaperçu* », explique le Pr Nathaniel Landau, du département de microbiologie de la faculté de médecine de l'université de New York (États-Unis), qui fait partie des découvreurs du gène CCR5.

Si l'absence totale du récepteur ACE2 est peu probable, le gène ACE2 pourrait être simplement moins exprimé à cause d'une rare mutation. Moins présent à la surface des cellules, il diminuerait la probabilité d'une infection. Une hypothèse soulevée dans une large étude génomique sur 700 000 malades publiée dans *Nature Genetics* par des chercheurs du Regeneron Genetics Center (Banville, États-Unis). Ils ont identifié un variant à proximité du gène ACE2, qui fait baisser de 37 % l'expression de celui-ci. Ces personnes seront ainsi dotées ▸

d'un récepteur ACE2 modifié, ce qui réduit leur risque d'infection de 40 %. Le niveau d'expression génétique joue donc bien sur le risque d'être contaminé. Pour autant, ces personnes ne sont pas totalement résistantes au Sras-CoV-2. Le récepteur des « jamais covidés » pourrait aussi être formé légèrement différemment de celui des malades classiques. « *Les régions du récepteur qui sont indispensables à la régulation de la pression artérielle ne sont pas celles du récepteur du coronavirus, qui servent à sa propagation,* explique Olivier Schwartz. *Ce sont deux fonctions bien différentes. Pour preuve, certains médicaments antihypertenseurs ont un effet sur ACE2. Et pourtant, la fonction de récepteur n'est pas affectée.* » Justement, si une cible génétique pouvait être identifiée, elle ouvrirait la voie à un nouveau traitement. L'identification de la mutation CCR5 dans le VIH a par exemple permis de guérir trois malades grâce à des greffes de moelle osseuse issue de donneurs porteurs de ce gène *(lire S. et A. n° 914, p. 20)*. Le Covid-19 aussi aurait cruellement besoin d'une telle cible. L'émergence de variants avec des protéines hautement mutées limite désormais l'efficacité des anticorps monoclonaux contre le Sras-CoV-2.

Peut-être les analyses génétiques ne livreront-elles aucun secret, ne laissant qu'une piste environnementale ouverte. La résistance des « jamais covidés » ne tiendrait alors qu'à une question de *timing* liée au va-et-vient des différents virus qui nous entourent. « *Lorsque nous tombons malades, notre organisme se met dans une sorte d'"état antiviral." Avec la grippe, par exemple, le système immunitaire produit de l'interféron, une puissante protéine de la famille des cytokines* », explique Olivier Schwartz. Or, son action antivirale permet de protéger les cellules avoisinantes de l'infection et de limiter la propagation du virus. « *Si le patient croise le Sras-CoV-2 pile au moment où il est déjà dans un état antiviral, il se pourrait qu'il soit moins sensible et qu'il ne tombe pas malade.* » Une hypothèse difficile, voire impossible à vérifier *a posteriori*.

INSTITUT PASTEUR

« Si le patient croise le Sras-CoV-2 pile au moment où il est déjà dans un état antiviral, il se pourrait qu'il ne tombe pas malade »

Olivier Schwartz, directeur de l'unité Virus et immunité à l'Institut Pasteur, à Paris

L'apparition des symptômes bloquée par une mutation

Les allées et venues des différents virus dans notre organisme pourraient malgré tout avoir permis l'émergence des « jamais covidés », qui ne seraient, en réalité, que des infectés asymptomatiques. Une piste sur laquelle travaille une équipe à l'université de Californie à San Francisco (États-Unis) qui a récemment identifié une mutation pouvant bloquer l'apparition des symptômes… sans pour autant empêcher l'infection. À condition que les infectés aient déjà eu à combattre les coronavirus « du rhume » (HKU1-CoV et OC43-CoV). Reste à expliquer pourquoi leurs tests PCR ne sont jamais revenus positifs du laboratoire. Quoi qu'il en soit, les patients porteurs de cette mutation ne seraient donc pas à proprement parler des « jamais covidés ». Cela n'exclut toutefois pas l'identification, toujours possible à l'avenir, d'un « supergène » de résistance. ■

Coralie Lemke @CoralieLemke

FORMES SÉVÈRES

Des décès du Covid-19 expliqués par des anomalies génétiques

Alors qu'ils étaient jeunes et ne présentaient aucune comorbidité comme le diabète ou l'obésité, ils sont décédés du Covid-19. Deux études publiées dans *Science* en août 2021 ont montré que 25 % des formes graves de la maladie s'expliquent par des anomalies génétiques ou immunologiques. Dans la première publication, l'équipe de l'institut Imagine, à Paris, s'est penchée sur le patrimoine génétique des malades masculins. Les formes graves étant plus fréquentes chez les hommes, les chercheurs ont fait le pari de passer à la loupe le chromosome X unique chez cette catégorie. Et en effet, ceux ayant fait une forme grave possédaient des variants différents au niveau du gène TLR7, qui joue un rôle majeur dans la production d'interféron de type 1, de puissantes molécules antivirales. Ces mutations expliquent aussi en partie pourquoi une population jeune peut être touchée par des formes graves. Dans la seconde publication, les auteurs ont démontré que 15 à 20 % des formes sévères sont causées par la présence, dans le sang des patients, d'auto-anticorps qui bloquent justement l'effet protecteur de l'interféron de type 1. Sans résistance de l'organisme, le virus peut donc se répliquer de façon incontrôlée.

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

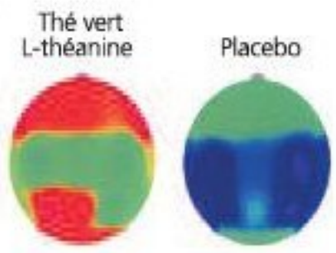
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au 01 84 20 63 77 ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**

Les promesses et les risques du régime cétogène

Privilégier les lipides au détriment des glucides permettrait de maigrir rapidement. Mais cette diète induit un déséquilibre nutritionnel et doit donc être suivie avec prudence.

Très faible en glucides et à haute teneur en graisses, le régime cétogène (appelé « *keto diet* » par les Anglo-Saxons) est vanté pour ses vertus amaigrissantes, mais aussi ses capacités à prévenir certaines maladies. Ces dernières années, il connaît un certain succès, comme en témoignent les dizaines d'ouvrages parus à son sujet. Cependant, il demeure nutritionnellement déséquilibré et difficile à suivre sur le long terme. Il n'est donc pas à appliquer dans toutes les assiettes.

Il accroît fortement la consommation de graisses

Le régime cétogène strict repose sur une réduction drastique de la consommation en glucides au profit d'un apport massif en lipides. 5 % des apports énergétiques journaliers (soit environ 25 g pour 2000 kcal journalières) sont ainsi apportés par les glucides, contre 40 à 55 % selon les recommandations de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses), et 70 à 90 % par des lipides (contre 35 à 40 % habituellement). L'apport en protéines reste stable (10 à 20 % de l'apport énergétique total) (1). Les cellules qui se nourrissent normalement de glucose se mettent alors à utiliser une voie annexe pour produire de l'énergie, passant par la dégradation par le foie des acides gras (ou lipolyse) en corps cétoniques.

155 à 200 g de lipides

doivent être consommés chaque jour lorsque l'on suit un régime cétogène strict, contre 88 g au maximum pour une alimentation traditionnelle.
(SOURCE : ANSES.)

Prudence en cas d'excès de cholestérol

Parce qu'ils procurent des quantités importantes de glucides, les céréales (blé, riz…), les légumineuses (lentilles, pois chiches…)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

LIPOLYSE Mécanisme mis en œuvre par l'organisme pour dégrader les graisses, afin de les rendre absorbables et utilisables.

CORPS CÉTONIQUES Substances produites lors de la dégradation des graisses dans l'organisme, éliminées par les reins dans les urines. Ils comptent l'acétone, l'acide acétylacétique et l'acide bêta-hydroxybutyrique.

ACIDES GRAS MONO-INSATURÉS (AGMI) Lipides présentant une double liaison entre deux atomes de carbone. Ils contribuent à réduire les risques de maladies cardio-vasculaires et d'hypertension.

et les fruits (une banane apporte 23 g de glucides) sont à limiter, de même que certains légumes comme la betterave ou la carotte. À l'inverse, les lipides sont fournis en quantité par le fromage, la crème fraîche, les huiles, la charcuterie, etc. Prudence en cas d'excès de cholestérol sanguin : la consommation importante de graisses saturées peut être néfaste pour le système cardio-vasculaire. Mieux vaut privilégier les acides gras polyinsaturés (ou oméga 3), bons pour le système cardio-vasculaire et le cerveau, présents dans les poissons gras (thon, maquereau, sardines, etc.), ainsi que les acides gras mono-insaturés (ou oméga 9), que l'on trouve dans l'avocat et les oléagineux.

Il expose à des carences en nutriments

L'apport plus limité en végétaux peut exposer à des déficits en fibres, antioxydants, vitamines (B9, B6, E, etc.) et minéraux (calcium, magnésium, potassium, etc.). Le régime cétogène favoriserait ainsi les calculs rénaux et la perte osseuse (2). Par ailleurs, ce régime entraîne certains effets indésirables décrits comme une « grippe cétogène » : fatigue, nausées, étourdissements, diminution de l'énergie, sensation de faiblesse et altérations du rythme cardiaque. Ces symptômes liés à une augmentation des niveaux de corps cétoniques seraient importants les sept premiers jours de régime, avant de diminuer après quatre semaines (3).

Il serait bénéfique contre le diabète...

Les corps cétoniques réduisent la sensation de faim, ce qui induit une rapide perte de poids. La réduction drastique des apports glucidiques agit également sur la sensibilité à l'insuline et s'accompagne d'une amélioration du contrôle de la glycémie chez les personnes prédiabétiques et diabétiques (4). Toutefois, des travaux américains alertent sur les conséquences de ce régime à long terme. Dans un premier temps, chez la souris, la production de corps cétoniques entraîne la diffusion dans l'organisme de lymphocytes T gamma delta — des cellules du système immunitaire —, conduisant à un meilleur métabolisme et à un risque moindre de diabète de type 2. Mais au-delà d'une semaine de régime, les rongeurs consomment davantage de graisses qu'ils n'en brûlent, favorisant une obésité et un diabète (5). Des résultats qui devront maintenant être validés par des études cliniques menées à long terme chez l'humain.

... et contre d'autres maladies

Le régime cétogène réduit la fréquence des crises d'épilepsie chez des enfants souffrant de formes résistantes aux traitements médicamenteux (6), sans que l'on comprenne de façon approfondie le mécanisme. Il aurait aussi des effets positifs sur les fonctions cognitives (en particulier la mémoire) des personnes âgées atteintes ou présentant un risque élevé de contracter la maladie d'Alzheimer. Les rares études réalisées chez des personnes souffrant de la maladie de Parkinson montrent une diminution des troubles moteurs et non moteurs de la maladie (7). Mais faute de recul et d'études suffisantes, ce régime n'est pas indiqué pour ces pathologies. ■

Sylvie Boistard @syboistard

BRUNO RAYNARD Chef de l'unité transversale de diététique et de nutrition de l'Institut Gustave-Roussy à Villejuif (Val-de-Marne)

En parler d'abord à son cancérologue

« Les études menées sur des animaux de laboratoire et sur des cultures cellulaires restent mitigées en cas de cancer quant à la capacité de ce régime, en supprimant la principale source d'énergie des cellules cancéreuses (le glucose), à réduire la taille d'une tumeur. Chez l'humain, on est en attente de résultats d'études contrôlées randomisées. En raison du risque de perte de poids et de masse musculaire, ce régime est pour l'heure déconseillé aux personnes dénutries ou à risque de dénutrition (8). Avant de se lancer, il est important d'en discuter avec son cancérologue qui pourra mettre en place un suivi coordonné avec un nutritionniste. »

(1) Actualisation des repères du PNNS, Anses, 2016.

(2) Ketogenic Diets and Chronic Disease, Crosby L. et al, *Frontiers in Nutrition*, 2021.

(3) Consumer Reports of "Keto Flu" Associated With the Ketogenic Diet, Bostock E. et al, *Frontiers in Nutrition*, 2020.

(4) A ketogenic Diet is effective in improving Insulin sensitivity in individuals with type 2 diabetes, Skow SL. et al, *Current Diabetes Reviews*, 2022.

(5) Ketogenesis activates metabolically protective cells in γδ T visceral adipose tissue, Goldberg EL. et al, *Nature Metabolism*, 2020.

(6) The ketogenic diet and other dietary treatments for refractory epilepsy in children, Sharma S. et al, *Annals of Indian Academy Neurology*, 2014.

(7) Role of ketogenic diets in neurodegenerative diseases, Wlodarek D., *Nutrients*, 2019.

(8) Jeûne, régimes restrictifs et cancer : revue systématique des données scientifiques, Expertise collective, Réseau NACRe, 2017.

JÉRÔME ET LAURENT TRICLET/WWW.MONDESOUTERRAIN.FR

De très nombreux souterrains aménagés au nord et à l'ouest du territoire entre le Xe et le XVIIe siècle ont servi de lieux de stockage de denrées, de communication ou encore de refuge durant les guerres de religion (ici, le souterrain-refuge de Fauroux, dans le Bordelais).

Dans les souterrains médiévaux de France

De la Picardie au Poitou, des milliers de cavités dissimulées sous des bâtiments ruraux ont été aménagées au Moyen Âge par les habitants. Elles servaient de refuge dans les périodes de troubles, mais aussi de lieu de stockage. Reportage en Anjou dans l'un de ces édifices souterrains encore méconnus.

Par Marine Benoit @marin_eben

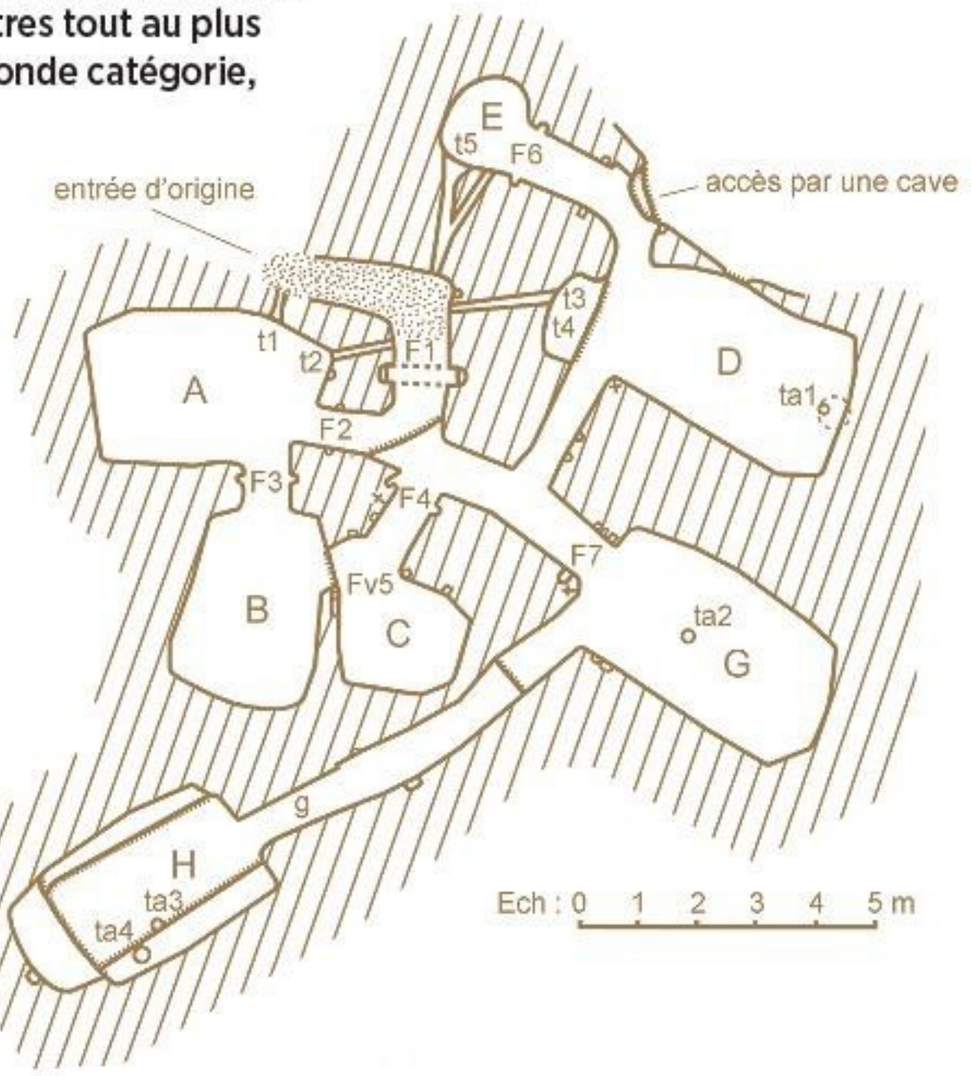
Le silence est total, tout comme l'obscurité, au point qu'il est impossible de faire un pas sans une lampe vissée sur le front. À droite comme à gauche, le faisceau de lumière nous dévoile d'étroits corridors, bouches béantes et obscures prêtes à nous engloutir. L'échine courbée, nous évoluons à pas lents, tant pour éviter de nous cogner la tête sur le plafond que pour ne pas frôler les chauves-souris qui y sont suspendues, ailes repliées mais déjà prêtes à fuir. « *Nous les avons dérangées, elles vont finir par s'envoler* », lance Laurent Triolet, notre guide. Au sol grouillent de minuscules insectes, attirés par les déjections des chiroptères, quand les parois rocheuses, elles, ont été par endroits colonisées par d'étranges champignons ramifiés, stimulés par l'extrême humidité de l'atmosphère. Nous sommes dans l'un des souterrains médiévaux les mieux préservés de France. Un dédale de couloirs dont l'existence, sous le jardin d'une petite maison blanche située dans un village d'Anjou*, à une heure de route de Tours, est difficile à soupçonner.

Cet ouvrage pourrait bien être ce que l'érudit Alexandre Bouthors a appelé en 1838 « *souterrain-refuge* ». Près de 800 d'entre eux ont été recensés depuis le XIXe siècle, en grande partie dans le sous-sol des campagnes de l'ouest et du nord de la France. Ils auraient été creusés par milliers entre le Xe et le XVIIe siècle pour servir d'abri temporaire à la population rurale et de cachette pour leurs vivres en périodes de troubles. Avec son ▸

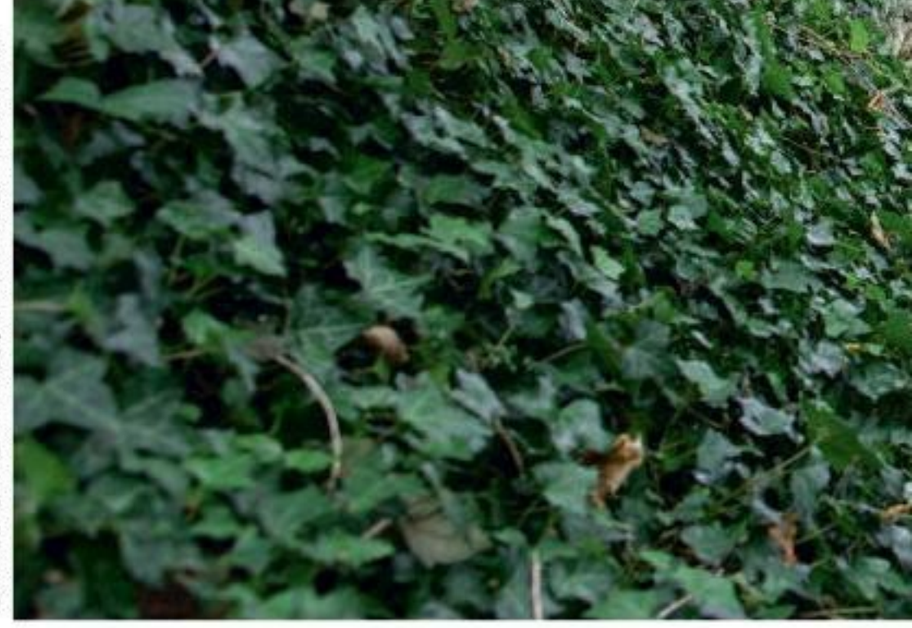
PLANS

Deux modèles distincts à l'ouest et au nord de la France

Composés d'une galerie d'accès unique desservant un ensemble de salles reliées par des couloirs étroits, les souterrains ruraux du Moyen Âge ont à peu près tous été conçus sur le même modèle. Néanmoins, ils peuvent être divisés en deux catégories : une première localisée dans l'ouest de la France et qui regroupe de « petits » souterrains-refuges au tracé irrégulier, courant sur quelques dizaines de mètres tout au plus *(exemple ci-contre)*. Une seconde catégorie, propre au nord de la France, comprend des réseaux bien plus vastes — s'étalant sur 50 à 350 mètres — qui s'enfoncent à une bonne dizaine de mètres de profondeur, voire davantage. Ces derniers peuvent compter plus d'une centaine de salles !



Le souterrain-refuge visité dans ce reportage se compose de 6 salles voûtées (A, B, C, D, G et H) dont la dernière, au bout d'un étroit goulet, ressemble à une chapelle.



JÉRÔME ET LAURENT TRIOLET/WWW.MONDESOUTERRAIN.FR

frère Jérôme, Laurent Triolet explore depuis les années 1980 ces *« monuments oubliés, anonymes et invisibles, qui ne sont ni de simples trous, ni de simples caves »*. Du moins ceux qui ont pu résister aux affres du temps et des machines pour être sondés.

« On parle plus généralement de "souterrains aménagés" pour désigner ces cavités creusées par l'humain dans des buts divers et souvent difficiles à déterminer », précise Laurent Triolet. On trouve ainsi parmi eux, à côté des souterrains-refuges propres à la société rurale, quelques souterrains de communication, destinés à se déplacer d'un point à un autre sans être vu (souvent de l'intérieur d'un château vers l'extérieur), ou encore des souterrains annulaires, étranges ouvrages en forme d'anneaux dont la raison d'être reste à ce jour énigmatique.

Des ouvrages souvent mis au jour par hasard

Nombre d'entre eux ont été redécouverts des siècles après avoir été façonnés, à la faveur d'un effondrement soudain sous le poids d'un troupeau de vaches ou après le passage d'un tracteur. Celui que nous visitons aujourd'hui a lui aussi été mis au jour par accident, lors du creusement de la cave extérieure de l'habitation *(voir la photo ci-dessus)*. *« Ce n'est pas l'entrée d'origine, qui se trouvait au nord-ouest, peut-être dissimulée dans un bâtiment. Elle est aujourd'hui rebouchée. »* Pour pénétrer dans le tunnel, il faut donc aujourd'hui s'aventurer dans cette cave, qui a surtout des allures de grotte. Tout au fond, un trou en hauteur permet de s'y glisser à l'aide d'une échelle que l'humidité a rendue spongieuse. Laurent Triolet a exploré plusieurs fois la cavité, avec l'autorisation de ses propriétaires qui en ignoraient l'existence quand ils ont acquis leur maison. Sans doute façonnée entre le XIIIe et le XVe siècle, comme le laisse supposer la présence sur ses parois d'un type de meurtrières assez normalisé ; elle est mentionnée dès le XVIIe siècle dans l'acte de sépulture d'un défunt dont le corps est retrouvé à l'intérieur un jour de juin 1655.

Notre accompagnateur a tenu à être clair : malgré l'étendue de leurs connaissances sur ces souterrains et un travail de recensement respecté dans le milieu

L'entrée actuelle du souterrain par cette cave (à gauche) n'est pas celle d'origine, dissimulée et aujourd'hui rebouchée. On parcourt ensuite un dédale de corridors parfois très étroits (ci-dessous). Au fond de la galerie, la salle H (ci-contre) comporte des bancs de pierre et un « autel ».

archéologique, son frère et lui-même ne sont ni historiens ni archéologues. Le premier est docteur et ingénieur en chimie, le second professeur agrégé de sciences naturelles. Ensemble, ils ont publié une dizaine de livres sur le sujet. « *Très peu de monde s'intéresse à ces structures,* regrette le passionné. *Je crois que si j'étais devenu archéologue, je ne leur aurais jamais accordé autant d'attention. Tenez regardez, ce sont des trous de visée* », s'interrompt-il en pointant à mi-hauteur de la paroi d'une niche des orifices dans lesquels on ne peut espérer passer un bras. « *Débouchant de l'autre côté du mur, là où se trouvait l'entrée d'origine, ils ont pu être utilisés avec une arme de type épieu ferré ou une arme à feu portative — apparue dès la fin du XIVe siècle. En somme, ces trous servaient à atteindre un ennemi cherchant à pénétrer dans le souterrain avant qu'il n'ait pu en passer la porte.* »

Dans le boyau situé de l'autre côté des trous de visée, Laurent Triolet désigne cette fois des feuillures qui devaient accueillir autrefois une porte en bois. « *Rien ne nous dit que ce système de défense a vraiment servi un jour. C'est tout le problème avec les souterrains du Moyen Âge, les sources capables de nous éclairer sur la manière dont les villageois les ont occupés n'existent pas* », déplore le biologiste.

Nous savons néanmoins qu'à la période médiévale, tourmentée par la guerre de Cent Ans (1337-1453) et de multiples guerres civiles, les menaces sur le monde rural comme sur le monde urbain sont constantes. « *C'est pour*

© J.ET L.T TRIOLET

« Tout le problème avec les souterrains du Moyen Âge, c'est que les sources capables de nous éclairer n'existent pas »

Laurent Triolet, professeur agrégé de sciences naturelles, membre de la société archéologique de Touraine

A. ARLES ET F. LELEU, ARKEMINE, 2018

Relié à l'extérieur par des puits, des chatières ou des escaliers taillés dans la pierre, le réseau souterrain de communication du château n'a été exploré qu'en partie.

FOUILLES

Sous le château du Haut-Clairvaux, des kilomètres de galeries

Les souterrains médiévaux n'ont pas été uniquement aménagés sous les fermes et les églises des hameaux de campagne. Certains édifices fortifiés en comportent, auxquels les archéologues ont encore parfois accès. C'est le cas du château du Haut-Clairvaux (Vienne), une place forte stratégique située entre le Poitou, l'Anjou et la Touraine que le futur roi d'Angleterre Richard Cœur de Lion remania fortement, contre l'avis de son frère Henri, à la fin du XII^e^ siècle (une première occupation remonte néanmoins au XI^e^ siècle). Sous ses fondations, s'étendent en effet plusieurs kilomètres de galeries, dont une large partie reste à ce jour inexplorée. Reliées à l'extérieur par des puits, des chatières ou encore des escaliers taillés directement dans la roche, ces galeries comportent de nombreux aménagements, à l'instar de niches, de banquettes, de voûtes et de portes. « *On ignore la fonction précise de ces souterrains, tout comme la raison pour laquelle ils sont si étendus* », indique Céline Chauveau, archéologue pour le Bureau d'investigations archéologiques Hadès et responsable d'opération des fouilles du château entamées en 2014. « *Probablement ont-ils eu différentes fonctions selon les espaces et les époques.* » Lieu d'extraction du calcaire, de stockage de denrées, de parcage d'animaux mais aussi de refuge et d'habitat pour des individus, aucune hypothèse n'est exclue à ce jour. Pour sûr, ils ont en tout cas servi à certains moments de dépotoir : y ont notamment été retrouvés de nombreux squelettes de chiens, sans doute issus du chenil dont la présence au XII^e^ siècle est supposée dans la cour du château.

▸ *cette raison que les villages se fortifient et que les bourgs se développent* », explique Nicolas Prouteau, historien et maître de conférences en archéologie médiévale à l'université de Poitiers. « *Sans les communautés paysannes, les villes et les seigneuries meurent. Aussi en temps de guerre, les campagnes sont les cibles privilégiées des armées ennemies et autres pillards. Un seigneur qui ne se souciait pas de protéger sa population ne faisait pas long feu.* » Si ce spécialiste de la construction médiévale n'exclut pas que de tels édifices aient pu être bâtis sous la supervision des seigneurs, il préfère ne pas les qualifier de « refuges ». « *D'abord parce qu'on protégeait également les habitations, mais aussi parce qu'ils ont très bien pu être de simples lieux de stockage de denrées tout au long de l'année. Pour une famille au Moyen Âge, avoir des réserves de sel, de blé ou de vin est un marqueur de richesse.* » Jérôme et Laurent Triolet n'excluent pas non plus que ces souterrains aient servi en période de calme : « *Nous avons dans certains d'entre eux des silos à grains qui laissent entendre que les cavités s'intégraient à la vie quotidienne des communautés.* »

Au fond d'une galerie, une salle ressemblant à une chapelle

Au fil de notre déambulation dans les étroits couloirs et les six salles voûtées *(voir le plan p. 86)*, les traces d'une vie passée dans ce labyrinthe dissimulé se dévoilent progressivement à nous : à différents endroits ont été façonnées dans la pierre des banquettes ou des niches à lampe (qui pouvaient être des chandelles de suie ou de résine, ou encore de petites lampes à graisse ou à huile) dont les parois sont encore noircies par les flammes. Plusieurs intersections sont également marquées de petites croix chrétiennes, gravées profondément dans la roche. Le vestige le plus impressionnant est aussi le mieux caché, dans la salle dite terminale — la plus en retrait de l'entrée —, à laquelle on ne peut accéder qu'après avoir par-

couru plusieurs galeries et rampé sur environ deux mètres dans un étroit goulot. Sur le mur qui fait face à l'entrée de cette pièce haute d'environ 1,90 mètre, se dresse ce qui ressemble à un autel flanqué de bancs. *« Bien sûr, on est tenté de penser qu'il s'agit d'une chapelle, mais là encore, l'utilisation jadis de cette pièce comme un lieu de culte reste hypothétique. C'est en tout cas une salle atypique, je n'en connais pas d'autre semblable »*, confesse Laurent Triolet.

Un refuge nocturne pour les villageois et leurs animaux

De grands souterrains-refuges villageois localisés spécifiquement dans le nord de la France et construits plus tardivement, entre le XVe et le XVIIe siècle, peuvent néanmoins nous éclairer sur la façon dont les ouvrages plus exigus de l'ouest étaient utilisés en cas de menace. Les témoignages transcrits dans des textes contemporains de leur utilisation laissent notamment entendre que lorsque des soldats se rapprochaient ou que des pillards rôdaient, la communauté ne décidait pas immédiatement de s'installer sous terre. *« On apprend dans ces récits qu'elle ne s'y réfugiait dans un premier temps que la nuit, préférant poursuivre les travaux agricoles la journée. Certains faisaient le guet, prêts à donner l'alerte. Mais une fois la nuit tombée, il devenait difficile de repérer la venue des pillards »*, rapporte Laurent Triolet. Les villageois s'y retiraient alors avec cochons, vaches et chevaux, mais aussi certainement avec leurs biens les plus précieux. *« Tant que la menace n'était pas au-dessus de leurs têtes, ils remontaient au petit matin tellement les conditions de vie y étaient difficiles. »* Obscurité, mauvaise qualité de l'air, humidité, promiscuité et, surtout, absence de latrines (aucune trace n'en a été retrouvée dans le moindre souterrain) : ces abris cochaient toutes les cases de l'inhospitalité. Dans une page de son journal rédigé en 1686, Jean Migault, maître d'école protestant, décrit leurs terribles effets sur ses élèves et d'autres personnes qui furent forcés de se cacher dans un souterrain d'Olbreuse, dans le Poitou, pour échapper aux dragonnades (des persécutions dirigées sous le règne de Louis XIV contre les communautés protestantes du royaume de France, entre 1681 et 1685) : *« Vous savez, vous deux qui y avez été renfermés, qu'il vous fut impossible d'y rester qu'environ trois semaines, et encore avec tant d'incommodités et de peines qu'à votre sortie, vous étiez tous autans morts que vifs, ayant été enterrés sans voir aucun air ni de clarté que la chandelle, n'y ayant que la petite entrée dont j'ay parlé, qui vous fournissoit la respiration, et de laquelle vous étiez assez éloignez. »*

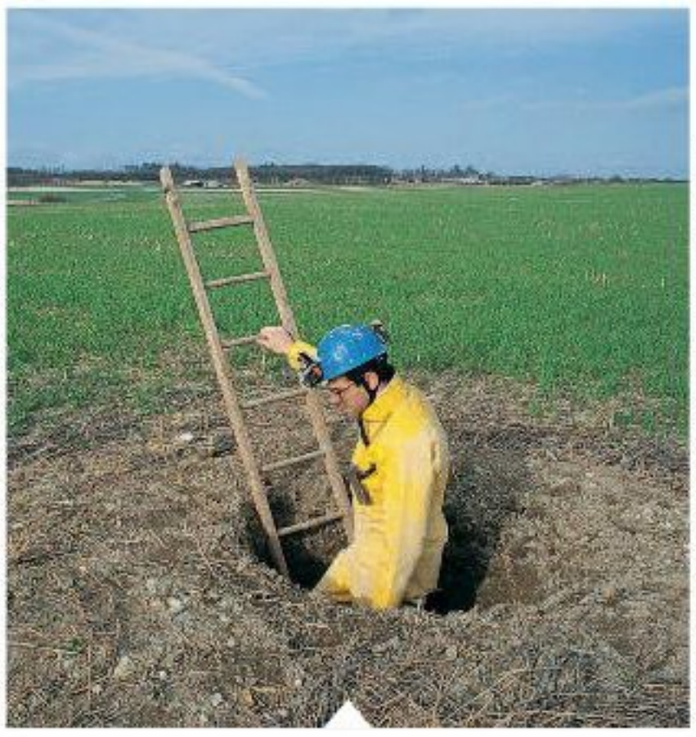
Nombreux sont les souterrains qui n'ont pas résisté aux affres du temps. Aujourd'hui, certains sont mis au jour lors de chantiers de construction, mais leur découverte n'entraîne malheureusement pas toujours l'intervention d'une équipe de recherches archéologiques préventives. *« Ils finissent presque toujours par être détruits,* déplore Laurent Triolet. *C'est regrettable, car ce sont des édifices souvent conservés dans leur intégralité, dont on peut encore observer les parois, les voûtes, examiner les aménagements et même toucher la roche qui conserve les empreintes des coups de pic qui l'ont creusée. »* L'archéologie des souterrains médiévaux reste à inventer. ■

* À la demande des propriétaires du terrain, le nom du village ne sera pas mentionné.

RÉSEAUX

Le souterrain, objet de mythes et de fantasmes

Qui n'a pas entendu un jour parler d'un mystérieux réseau souterrain qui s'étendrait sous le sol d'un village ou d'un domaine, courant sur des kilomètres et reliant secrètement châteaux, abbayes ou églises ? Ces galeries de communication à longue distance n'ont pourtant jamais existé, malgré les nombreux témoignages dont ils font l'objet, transmis de génération en génération. En réalité, les rares souterrains de fuite connus se limitent à de modestes couloirs ne parcourant pas plus d'une dizaine de mètres à faible profondeur. En somme, il s'agit d'un mythe qui trouve sans doute son origine dans divers effondrements survenus dans la région et qui, une fois reliés mentalement, ont suffi à former un réseau gigantesque. Les souterrains ont par ailleurs toujours été considérés comme des endroits peu fréquentables : peuplés de créatures dangereuses, ils auraient été le théâtre d'occultes cérémonies attribuées à des sociétés secrètes. Là encore, il ne s'agit que de croyances populaires.



JÉRÔME ET LAURENT TRIOLET/WWW.MONDESOUTERRAIN.FR

Les effondrements accidentels au milieu des champs ont permis de découvrir de nouveaux souterrains (ici dans le Poitou).

POUR EN SAVOIR PLUS

- Le site de Jérôme et Laurent Triolet consacré aux souterrains : **www.mondesouterrain.fr**
- Leur dernier ouvrage : ***Des monuments sortis de l'ombre : les souterrains-refuges*** (éditions Errance & Picard, 2022).

Ramsès II ou les folles pérégrinations d'une momie

L'exposition « Ramsès et l'or des pharaons », qui a débuté en avril à Paris, présente en exclusivité le cercueil du pharaon. Retour sur l'histoire rocambolesque de la dépouille du souverain égyptien.

C'est le « clou » de l'exposition Ramsès et l'or des pharaons présentée à la Grande Halle de la Villette à Paris depuis le 7 avril : le cercueil de Ramsès II. Un prêt que les autorités égyptiennes n'ont consenti qu'à la France, alors que l'événement fait étape dans pas moins de dix villes dans le monde depuis 2021. Il faut dire que la momie que contenait le cercueil ne serait plus là sans l'intervention de scientifiques français. L'histoire remonte à 1976. Cette année-là, l'égyptologue Christiane Desroches Noblecourt organise la venue de la dépouille royale en France afin qu'elle soit étudiée par un collège d'experts, à la demande des autorités égyptiennes. Et pour cause : son corps est rongé par des champignons et des bactéries. *« Cette demande est le point de départ de l'exposition Ramsès le Grand qui aura lieu au Grand Palais, à Paris »*, explique Dominique Farout, égyptologue et commissaire de la nouvelle exposition.

Le 26 septembre 1976, l'ancien monarque est ainsi reçu en France tel un chef d'État, avec les honneurs de la République, et envoyé en « soins intensifs » au musée de l'Homme. La momie est finalement adressée au Laboratoire des rayonnements appliqués (Labra) de Saclay pour recevoir un traitement par rayonnement gamma, qui détruit les organismes vivants par irradiation. Ramsès est sauvé.

Ce n'était que la dernière péripétie d'une vie après la mort fort mouvementée pour le pharaon. Décédé vers l'âge vénérable — et tout à fait extraordinaire pour l'époque — de 90 ans, vers 1213 avant J.-C., après 66 ans et deux mois de règne,

1213 avant J-C. Mort de Ramsès II et inhumation dans la tombe KV7 de la Vallée des Rois.

1080 avant J-C. Première mise à l'abri de la momie dans la tombe de son père Séthi Ier (KV17).

969 avant J-C. Deuxième mise à l'abri dans la cache de Deir el-Bahari avec de nombreuses autres momies royales.

1871 Découverte de la cache de Deir el-Bahari par les frères Abd el Rassoul.

1881 Arrestation des frères Abd el Rassoul et transfert des momies royales, dont celle de Ramsès II, au musée de Boulaq.

J-P TARTRAT/GAMMA-RAPHO

1976 Transfert de la momie à Paris pour la sauver des champignons et bactéries.

1977 Retour au Musée égyptien du Caire.

2021 Déplacement au Musée national de la civilisation égyptienne.

SANDRO VANNINI / WORLD HERITAGE EXHIBITIONS - BRIDGEMAN IMAGES

Le sarcophage en cèdre de Ramsès II a été prêté exceptionnellement à la France, en souvenir du sauvetage de sa momie (en médaillon) en 1976.

Ramsès II le grand bâtisseur, le conquérant victorieux, père d'une centaine d'enfants, aurait bien mérité son repos éternel. Le destin en voulut autrement. À sa mort, sa momie quitte solennellement Pi-Ramsès — où se trouve le centre du pouvoir à l'époque ramesside — pour rejoindre Thèbes et celle qui devait être sa dernière demeure : la tombe KV7, creusée dans la Vallée des Rois.

Les artisans se payent en nature en pillant les nécropoles royales

Mais à peine soixante ans plus tard, son sommeil est troublé lors d'une grève organisée par les artisans de Deir el-Medineh. « *Au cours de cet événement, son tombeau fait l'objet d'une tentative de violation,* explique Christian Leblanc, égyptologue spécialiste de Ramsès II. *Les forces de l'ordre interviendront avant que quiconque ait pu y pénétrer.* » Le mal finit par être fait quelques décennies plus tard, sous le règne de Ramsès XI (1099-1069 avant J.-C.). L'institution royale, plus que chancelante, ne parvient plus à limiter les pillages. Trois nécropoles royales et les temples de millions d'années, bâtis pour assurer le culte funéraire des rois pour l'éternité, sont profanés. Les richesses dont ils regorgent sont emportées en guise de salaire en nature. « *Au cours de ces révoltes, le sarcophage de calcite de Ramsès II est brisé en mille morceaux et sa momie se voit dépouillée des nombreuses amulettes en or placées entre ses bandelettes* », poursuit Christian Leblanc.

Peu après, vers 1080 avant J.-C., une commission d'enquête est chargée d'évaluer l'ampleur des dégâts dans les tombes royales. Les momies sont alors minutieusement « rebandelettées » et Ramsès II est rapatrié dans la tombe de son père Séthi Ier (KV17), en meilleur état. « *On le place dans un cercueil en bois de cèdre, sans doute produit entre la fin de la XVIIIe et le début de la XIXe dynastie, qui n'avait pas été utilisé* », indique Dominique Farout. Un siècle s'écoule à nouveau, puis l'instabilité politique du royaume touche à son comble. Vers 969 avant J.-C., sous la menace de nouveaux saccages, plus de 40 momies royales de la Vallée des Rois — dont celle de Ramsès II — sont transportées dans un endroit tenu secret : la cache royale de Deir el-Bahari, dans la nécropole thébaine, face à Louxor, et dans laquelle Ramsès trouvera enfin la paix. « *Du moins pendant près de trente siècles* », lance Dominique Farout.

Un transfert sous protection armée

Un nouveau rebondissement se produit en effet en 1881. Depuis quelques années, d'étranges objets royaux circulent sur le marché des antiquités et éveillent les soupçons des autorités. La piste les conduit à une famille influente du village de Gournah, sur la rive ouest de Louxor. Mohamed, Ahmed, Hussein et Soliman Abd el Rassoul, quatre frères, avaient trouvé dix ans plus tôt l'ouverture de la tombe royale. Depuis, ils se servaient dans les trésors qu'elle contenait au gré de leurs besoins d'argent. À leur tour, les inspecteurs du service des Antiquités égyptiennes pénètrent le tombeau et en extraient les momies. Sous protection armée, ces dernières sont transportées au musée de Boulaq, premier musée public consacré à l'égyptologie (qui sera remplacé en 1902 par l'actuel Musée égyptien du Caire). Aux côtés de ses prédécesseurs et successeurs, Ramsès II est alors placé dans une vitrine dont il ne sortira qu'à de rares occasions, comme pour son voyage de huit mois en France. Si le cercueil est visible à Paris, la momie, elle, ne bouge plus : depuis 2021, elle repose finalement aux côtés de 22 autres momies royales dans le Musée national de la civilisation égyptienne, dont elle est une pièce phare. ■

Marine Benoît @marin_eben

Les outils numériques ont accéléré l'essor des usages multimodaux en ville : location de vélo ou de trottinette électriques, de voiture avec ou sans chauffeur au moyen de son smartphone.

Cinq questions pour participer à la révolution des déplacements

Les nouvelles mobilités, plus douces, font leur chemin pour répondre aux impératifs écologiques, mais aussi économiques. État des lieux et progrès à espérer.

Par Mathieu Chevalier, avec Agence Forum News

1 Comment repenser ses déplacements ?

À l'heure de la numérisation de la société, un déplacement ne se subit plus, il s'optimise. La multimodalité s'est ancrée dans les habitudes, en particulier dans les zones urbaines. Les outils numériques permettent de combiner les mobilités « douces », (marche, trottinette électrique, vélo électrique), les transports en commun et la voiture (personnelle, en libre-service, taxi ou VTC) pour se déplacer de façon plus efficace et flexible. Le trajet retour, par exemple, n'est plus conditionné par celui de l'aller.

Selon une enquête réalisée pour les mutuelles MMA par Opinionway, 75 % des Français utilisent déjà au moins deux modes de transport dans leurs déplacements réguliers, 29 % au moins trois. Pour les trajets plus longs, extra-urbains ou de banlieue à banlieue, le recours à la voiture reste largement dominant. Mais là encore, grâce aux outils numériques, de nouveaux usages se sont développés. C'est le cas du covoiturage qui a été multiplié par 3,5 entre février 2022 et 2023 (815 000 déplacements). Des pratiques encouragées par la hausse du prix des carburants (+ 6,7 % pour le SP95 en 2022).

2 Quelle mobilité douce de proximité choisir ?

L'essor récent des « engins de déplacement personnel motorisés » (EDPM) a rebattu les cartes des déplacements de proximité. Les EDPM ont remis au goût du jour la trottinette et le vélo, en exonérant leurs utilisateurs de l'effort physique qui leur était jusqu'ici associé. Le développement de la location (services proposés par les municipalités ou des sociétés privées comme Lime, Tier, Dott…) résout les problèmes liés à la possession (coût, stationnement, vol…). L'usage du vélo a ainsi augmenté de 28 % entre 2019 et 2021, selon l'association Vélo & Territoires. L'aménagement des pistes cyclables dans les grandes villes (1094 km à Paris, 540 km à Lyon) rassure et encourage de plus en plus d'usagers à opter pour ce moyen de transport, même s'il existe encore d'importantes disparités entre les villes. Les aides financières de l'État et des municipalités jouent aussi leur rôle de soutien. Mais il reste des freins comme la question de la sécurité (le port du casque n'est obligatoire qu'avant 12 ans), du vol (identification des cycles et stationnement sécurisés) et le manque de possibilités d'intermodalité train/vélo ou car/vélo.

3 La voiture réussira-t-elle le défi de l'électrique ?

Selon l'Insee, la part kilométrique de la voiture dans les déplacements est de 83 %. Il est donc impératif de réduire l'impact sur l'environnement de ce mode de déplacement. L'électrique permet tout d'abord de supprimer les émissions au moment de l'usage, ce qui, dans les agglomérations fortement touchées par la pol-

WWW.PRESSEPORTAL.DE/PM/135702/5062978

Pour être heureux, mangez mieux

Les études sont formelles : ce que nous mangeons influence directement notre humeur. Non seulement un bon repas est source de plaisir, mais une alimentation saine et équilibrée favorise aussi une humeur positive.

Des nutriments qui font du bien

Les centaines de milliards de neurones qui constituent le cerveau s'échangent en permanence des molécules appelées neurotransmetteurs, tels que la sérotonine, la dopamine et le GABA notamment qui influencent l'humeur. Sans eux, le moral est plus facilement en berne ! Le cerveau consomme chaque jour 20% des réserves de glucose, mais il a également besoin de nutriments spécifiques pour faire fonctionner son réseau de neurones et fabriquer les neurotransmetteurs.

Faire le plein d'Omega 3

Ces acides gras sont des constituants essentiels de la membrane qui enveloppe les cellules, et notamment les neurones. Des études ont montré le lien direct entre une carence en Omega 3 et la survenue d'une sensation de mal-être.

B comme Bien-être

Les Vitamines B, et en particulier les Vitamines B3, B6 et B9, sont essentielles au maintien de fonctions psychologiques normales. La Vitamine B5 participe en outre à la synthèse des neurotransmetteurs.

Magnésium : gare à la carence

Une carence en Magnésium peut favoriser les troubles de l'humeur. En situation d'anxiété, il est expulsé en grandes quantités des cellules. En situation d'angoisse intense et/ou chronique, le corps épuise donc rapidement ses réserves. Il s'ensuit non seulement de la fatigue, mais aussi une plus grande sensibilité à l'anxiété.

Des plantes dans votre assiette

Les pistils de la fleur de Safran contribuent à préserver l'équilibre émotionnel en favorisant une humeur positive et une sensation de relaxation, propices au bien-être.

La racine de Rhodiola est adaptogène : elle aide l'organisme à résister normalement aux situations d'anxiété. Son efficacité sur le burn-out a d'ailleurs été démontrée de très nombreuses fois dans des études cliniques.

Un geste simple pour retrouver le sourire

Zenytud est un concentré d'actifs naturels d'exception (Rhodiola, Safran et Lactium®) associés pour la première fois en une même formule pour agir sur les neurotransmetteurs les plus importants dans les troubles anxieux (GABA, sérotonine, dopamine).

Leur action synergique fait de **Zenytud** une formule à la fois puissante et naturelle, idéale en situation de mal-être psychologique.

Zenytud contient également du bisglycinate de Magnésium, la forme la mieux assimilée par l'organisme, ainsi que des Vitamines B qui contribuent à des fonctions psychologiques normales et à réduire la fatigue.

Zenytud peut être pris en continu tout au long de l'année et ne provoque ni effet indésirable ni accoutumance. La formule de **Zenytud** étant fortement concentrée, il est recommandé de demander l'avis d'un médecin avant son utilisation.

Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au 01 85 81 21 68 et sur www.zenytud.com

Zenytud est disponible en pharmacie grâce au code ACL.

Zenytud 60 gélules végétales code ACL **602 42 55**.

"Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour" www.mangerbouger.fr

lution, a un effet bénéfique immédiat. Cette énergie est de surcroît adaptée à la conduite urbaine, qu'il s'agisse de l'agrément (progressivité et absence de bruit) ou de l'autonomie (faible vitesse, nombreux freinages qui rechargent les batteries). La charge reste un problème. Fin 2022, la France comptait 82 000 bornes accessibles au public, pour un objectif de 100 000 en… 2021. Renault (avec l'application Plug Inn) et diverses start-up tentent de rendre accessibles les points de charge privés au nombre de 688 000 selon Enedis, mais souvent limités en puissance. Le frein le plus important reste le surcoût de cette technologie (20 %) sur une citadine, en raison de la cherté des batteries. L'achat est certes facilité par les aides (bonus de 5000 euros), mais la rentabilisation n'est encore envisageable que sur le très long terme.

4 Les transports en commun peuvent-ils séduire plus largement ?

Les transports en commun ne représentent que 11 % de la part kilométrique des déplacements, selon l'Insee. Deux critères peuvent permettre d'augmenter leur attractivité. Le premier est le prix, la fréquentation étant étroitement liée aux tarifs pratiqués. Mais en période d'inflation, de crises énergétiques et de verdissement des motorisations, se pose la question du financement. Le second critère est la qualité du service proposé. En matière de temps de transport (la marge d'acceptation est de 50 % en plus du temps en voiture), de confort (un voyage debout réduit l'acceptation du temps supplémentaire) et de fréquence. Enfin, un transport en commun n'est pas un transport commun : chaque territoire a ses spécificités, avec ses réponses adaptées.

5 L'avion sera-t-il le grand perdant des nouvelles mobilités ?

La pandémie a stoppé net le secteur aérien qui aurait pu ne jamais s'en relever. Mais la sortie de la crise sanitaire s'est accompagnée d'un besoin de voyage qui a relancé l'activité. En 2022, le trafic aérien a ainsi atteint 68,5 % de son niveau d'avant la crise, selon les chiffres de l'Iata(Association du transport aérien international, qui attend le retour à l'étiage pour cette année). Ce, malgré le contexte géopolitique et la crise de l'énergie, qui ont fait augmenter le prix des billets de 22 % (long-courriers) selon le ministère de la Transition écologique. Les compagnies aériennes se soucient aujourd'hui davantage de la pénurie de pilotes (entre 34 000 et 50 000 en 2025, selon le cabinet Wyman) que de l'absence de passagers. Si le mouvement *flyskam* — ou la honte de prendre l'avion —, né en Suède en 2018, a fait parler de lui, il ne se traduit pas dans les chiffres de fréquentation des avions. Il a en revanche mis la pression sur les avionneurs pour accélérer leur verdissement. Airbus avec le projet ZEROe et Boeing avec l'Ecodemonstrator sont engagés dans un processus de décarbonation de leurs appareils, grâce respectivement à l'hydrogène et aux carburants de synthèse. ■

AVIS D'EXPERT

YANN BRIAND RESPONSABLE MOBILITÉS DU FUTUR À L'IRT SYSTEMX

« L'IA offre un fort levier d'optimisation »

Comment définir l'intelligence artificielle (IA) appliquée à la mobilité ?
C'est la capacité à agréger et à traiter des données massives. L'objectif est d'extraire de la valeur de ces jeux de données qui sont hétérogènes, disparates et déconnectés. Un autre enjeu consiste à connecter différents domaines, par exemple la demande de transports et les besoins en énergie qui en découlent ou les problématiques de maintenance liées. Cela doit permettre d'anticiper les situations, une des grandes attentes liées à l'IA. Elle doit aussi permettre de repérer des signaux faibles dans l'évolution des déplacements, qui, sinon, ne pourraient pas être identifiés.

Quels sont les gains attendus ?
Les transports font aujourd'hui partie des environnements déjà fortement numérisés. L'optimisation du traitement de ces données grâce à l'IA offre des leviers d'amélioration de la performance. Les modèles qui en sortent ouvrent des perspectives d'un meilleur rendement sur le plan économique mais aussi, par extension, écologique et en matière d'efficacité d'usage. L'IA donne la possibilité de proposer un bouquet d'offres de mobilités adapté et dynamique dans un marché lui-même en pleine révolution.

Y a-t-il des freins au développement de l'IA dans la mobilité ?
Comme dans beaucoup de domaines, il y a de gros enjeux de souveraineté des données. Il faut pouvoir garantir un environnement de confiance et en assurer l'intégrité aux citoyens comme aux entreprises. ■

Propos recueillis par M. C.

Y. BRIAND

Le retour
des intellectuels

A l'heure des fakenews et du wokisme, rien de plus important que d'écrire contre le sens du vent. En rassemblant dix-sept éditorialistes, venus de tous les univers – politique, économie, philosophie, histoire, science –, *Challenges* veut redonner vie à l'univers trop absent de la pensée. Dix-sept intellectuels libres, pas forcément d'accord, s'expriment régulièrement dans *Challenges* et sur challenges.fr dans le respect de notre charte prônant « *la défense d'une économie ouverte, humaniste et de progrès* ».

Philippe Aghion
Economie

Michel Winock
Histoire

Paul Krugman
Economie

André Comte-Sponville
Philosophie

Jean Tirole
Economie

Patrick Artus
Economie

Luc Julia
Digital

Christian Gollier
Ecologie

Stefanie Stantcheva
Economie

Nicolas Domenach
Politique

Marc Semo
International

Vincent Beaufils
Economie

Anne-Marie Rocco
Economie

Ghislaine Ottenheimer
Politique

Maurice Szafran
Politique

Guillaume Malaurie
Société

Dominique Leglu
Sciences

Challenges

challenges.fr

Pour y accéder directement,
scannez le QR code

©M.Bertrand/Challenges-B.Delessard/Challenges-C.Lebedinsky/Challenges-B.Martinez/SetA
©M.Bertrand/Challenges-SP-Lagoutte/ACS-F.Mantovani/Gallimard-B.Levy/Challenges -Harvard-B

Grotte de Bizmoune (Région d'Essaouira, Maroc) ©A.Bouzouggar

LE MAROC, UN MUSÉE ARCHÉOLOGIQUE À CIEL OUVERT

Mehdi BENSAID (MB) ministre marocain de la Jeunesse, de la Culture et de la Communication (MJCC) : « Mettre en valeur ce patrimoine, le faire connaitre au plus large public, aux élèves, aux jeunes et à toutes les autres catégories d'âge est une priorité pour nous au MJCC, car au-delà des origines marocaines, ce patrimoine appartient à toute l'humanité. »

M. Mehdi BENSAID

DL: Le plus ancien représentant du genre Homo sapiens au monde a été découvert au Maroc. Peut-on affirmer que l'origine de l'Homme moderne se situe dans ce pays ?

MB : Cette découverte, décisive pour l'humanité nous permet, en effet, d'affirmer que le plus ancien Homo sapiens a vécu au Maroc, il y a de cela 300.000 ans. Le travail mené par une équipe mixte de l'Institut National des Sciences Archéologiques et du Patrimoine (INSAP), du collège de France et de l'Institut Max Planck, a permis de rajouter une pierre à l'édifice de l'histoire de l'Homo sapiens.

DL: Les méthodes de pointe comme l'analyse de l'ADN prélevé dans les ossements d'hominidés nous apportent un éclairage scientifique nouveau sur nos origines. Qu'en est-il de la découverte, au Maroc, du plus vieil ADN d'Afrique ?

MB : Effectivement, une équipe de chercheurs internationaux, de l'INSAP et de l'Institut Max Planck, a extrait des ossements de la grotte de Taforalt, le plus vieil ADN d'Afrique, datant de plus de 15 000 ans. Ces travaux, publiés dans la prestigieuse revue *Science*, ont permis de discerner un mélange entre des génotypes de l'Afrique de l'Ouest et du Levant, ce qui signifie que le métissage et la diversité culturelle du Maroc datent de bien longtemps.

DL: La découverte exceptionnelle de la plus ancienne parure du monde à Bizmoune (Région d'Essaouira), fabriquée à partir de coquillages marins, Tritia gibbosula, et datant de 150 000 ans fait du Maroc la contrée qui a vu naitre le concept du beau. Que peut-on dire de cette découverte ?

MB : Pour la première fois de son histoire, l'Homo sapiens fabrique une parure (a) non pas à des fins utilitaires ou de survie, mais pour servir d'ornement, pour susciter le respect ou l'admiration de ses pairs. Les prochaines découvertes nous donneront peut-être les raisons qui se cachent derrière ces créations. Mais nous pouvons affirmer qu'il y a 150.000 ans, l'homme de Bizmoune a inventé le concept du beau, de l'esthétique.

DL: La grotte de Taforalt située dans la région de l'Oriental cumule les découvertes archéologiques exceptionnelles. Pouvez-vous nous en dire un mot ?

MB : Ah oui absolument. La grotte de Taforalt, située à proximité de Berkane, est un site archéologique exceptionnel. Il nous offre, sur 170 000 ans, des découvertes majeures de l'histoire de l'humanité. On y a découvert l'une des plus grandes nécropoles connues, avec plus de 200 squelettes humains complets, datant de 15 000 ans; le plus vieil ADN d'Afrique datant de la même époque et l'une des plus anciennes parures de l'humanité confectionnée, en coquillages marins, datant de 82 000 ans.

DL: Et les découvertes ne s'arrêtent pas là apparemment.

MB : Tout à fait, on peut citer la découverte exceptionnelle, par la chercheuse Ferembach en 1962, d'un crâne trépané vieux de plus de 15.000 ans. La cicatrisation du tissus osseux perforé (b) montre que le patient a survécu à son opération. Ajoutons à cela une découverte étonnante sur un sujet qui fait partie du quotidien de milliards de personnes aujourd'hui. Une équipe de chercheurs internationaux, des universités de Cambridge et d'Oxford et de l'Institut Max Planck, menée par le professeur Abdeljalil Bouzouggar, a révélé, dans la prestigieuse revue de l'Académie des Sciences Américaine – PNAS, que les premières caries de l'humanité ont été constatées dans la grotte de Taforalt, sur des chasseurs-cueilleurs morts il y a 15.000 ans. Plus de la moitié de leurs dents étudiées sont percées de caries (c). La fouille minutieuse a mis en évidence de foyers de feu avec des restes de glands, démontrant que les Hommes de Taforalt se nourrissaient de glands cuits. Ces sucres fermentables collaient aux dents, comme des bonbons, favorisant le développement des bactéries responsables des caries.

DL: L'Homme de Taforalt est aussi connu pour l'amour qu'il portait aux enfants en bas âge. Que nous disent les fouilles archéologiques à ce sujet ?

MB : Nous avons pu découvrir que l'Homme de Taforalt, rapportait des pierres tombales bleues, situées à quelques kilomètres de la grotte, afin de les utiliser exclusivement dans les tombes des enfants. Ce qui témoigne de la place particulièrement importante que détenaient les enfants au sein de ces communautés.

DL: Ce patrimoine préhistorique exceptionnel doit être connu et protégé.

MB : Mettre en valeur ce patrimoine, le faire connaitre au plus large public, aux élèves, aux jeunes et à toutes les autres catégories d'âge est une priorité pour nous au MJCC, car au-delà des origines marocaines, ce patrimoine appartient à toute l'humanité. La préhistoire représente 95% de notre histoire et constitue l'une des périodes les plus étudiées, mais reste peu connue par le grand public. Il faut donc dresser des plans d'action afin de remédier à cette situation.

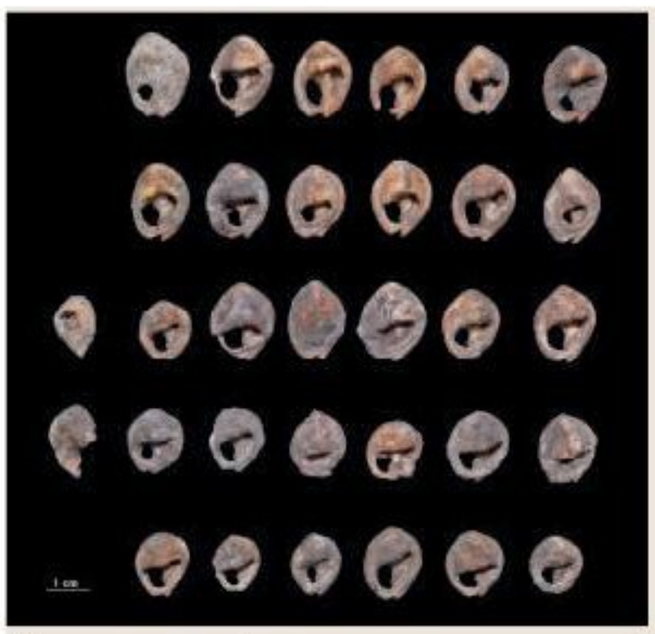
DL: Que déployez-vous comme stratégie pour atteindre l'objectif de préserver ce patrimoine préhistorique exceptionnel ?

MB : Sous le leadership de Sa Majesté le Roi Mohammed VI, nous nous attelons à mettre en place plusieurs projets afin de mettre en avant l'écosystème patrimonial marocain, et ce à travers l'organisation d'événements et d'expositions, l'édition de livres visant à sensibiliser les citoyens sur l'importance du patrimoine préhistorique et de sa préservation. Cette vision s'est concrétisée davantage à travers l'organisation du mois du patrimoine, dans plusieurs régions du Royaume, afin de mettre en exergue la richesse, la diversité et la spécificité du patrimoine matériel et immatériel de chaque région du pays.
Le Maroc mène également une politique de création de musées, visant à diffuser les savoirs et inciter les jeunes générations à préserver cet héritage universel.
La formation des jeunes générations est aussi l'une de nos priorités. Nous offrons une formation de qualité à l'INSAP, en veillant à la création de divers partenariats avec des homologues internationaux, pour un meilleur échange d'expertise et de savoirs. Au niveau international, le Ministère de la Culture organise également divers événements afin de faire connaitre l'importance des découvertes archéologiques au Maroc dans la reconstitution de l'histoire de l'humanité. Dans ce sens, un grand colloque a été organisé, récemment, au siège de l'UNESCO à Paris, sous le thème « La portée universelle du patrimoine préhistorique du Maroc». L'objectif de ce colloque était de présenter l'ensemble des découvertes réalisées sur le territoire marocain, dont une bonne partie a fait l'objet de notre échange d'aujourd'hui.

DL: L'inscription de ces trésors au patrimoine mondial de l'humanité ne serait-il pas le meilleur moyen de les préserver ?

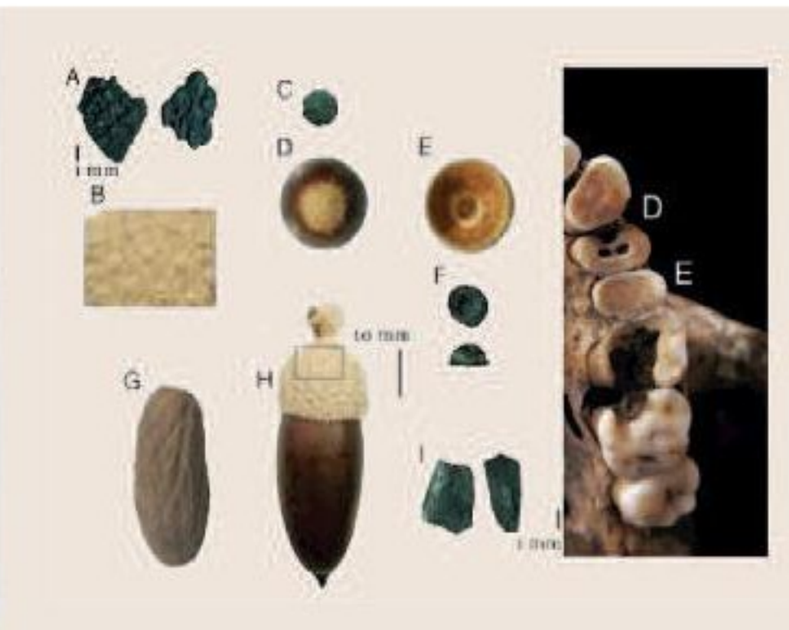
MB : Nous avons déjà inscrit plusieurs sites sur la liste du patrimoine national et nous travaillons actuellement sur un programme d'inscription au patrimoine mondial de l'humanité des sites majeurs comme la grotte de Bizmoune, Jbel Irhoud, etc.
Mme Audrey Azoulay, Directrice Générale de l'UNESCO, a rappelé, le 24 janvier 2023 à Paris, l'engagement de Sa Majesté le Roi Mohammed VI en faveur du renforcement de la coopération entre le Maroc et l'organisation onusienne, notamment dans le domaine de la préservation du patrimoine matériel et immatériel de l'humanité. Nous en sommes fiers et œuvrons au quotidien à mettre en marche les Directives Royales pour construire le Maroc de demain, celui de la science, de la culture, de l'économie de la connaissance et du développement durable.

Propos recueillis par Driss Louaradi Ph.D.



(a) Coquillages (T. gibbosula and C. rustica) de la parure de Bizmoune (150 000 ans). Publication: El Mehdi Sehasseh & al. (2021) Early Middle Stone age personal ornaments from Bizmoune cave, Essaouira, Morocco. *Science* vol 7, issue 39.

(b) La plus ancienne opération chirurgicale, au monde, pratiquée sur un crâne datant de plus de 15 00 ans. Ferembach, D. & al. (1962). La nécropole épipaléolithique de Taforalt (Maroc oriental) : étude des squelettes humains. *Edita Casablanca, Rabat*.



(c) Caries à droite et glands fossiles à gauche de la grotte de Taforalt. Louise T. Humphrey & al. (2014) Earliest evidence for caries and exploitation of starchy plant foods in Pleistocene hunter-gatherers from Morocco. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 98

▶ C'est à voir
p. 100

▶ Le ciel du mois
p. 101

▶ Chroniques
p. 102

▶ Questions de lecteurs
p. 104

▶ Solutions des jeux
p. 105

▶ Jeux
p. 106

MICHAEL DURHAM/MINDEN PICTURES/BIOSPHOTO

Le papillon de nuit brouille avec ses ailes les échos des signaux émis par la chauve-souris qui le chasse.

Silence, ça vit !

L'éco-acousticien Jérôme Sueur propose une plongée passionnante dans les multiples dimensions du silence.

SONS Chut ! Fermez les yeux et tendez l'oreille : les sons sont omniprésents. Même loin de l'agitation de l'activité humaine, lorsque tout semble calme. Est-ce à dire que le silence n'existe pas ? Non. On peut même en faire l'expérience dans la nature, à trois conditions — « *éloignement, solitude, immobilité* » —, nous explique Jérôme Sueur. On accède alors à un monde « *tout sauf vide et mort* », dont le spécialiste d'éco-acoustique — l'étude des sons de la nature — se fait fort de nous montrer la richesse. Indispensable à la survie des proies comme des prédateurs (le papillon de nuit, par exemple, utilise le revêtement de ses ailes pour étouffer les échos des signaux envoyés par les chauves-souris qui le chassent), le silence peut aussi se faire amoureux. Il joue ainsi un rôle essentiel dans la séduction chez les grillons, les cigales ou encore certaines espèces d'oiseaux. Il peut également manifester la domination d'un individu par un autre, comme chez le xénope commun, une espèce de grenouille.

Le silence contient, en somme, des informations essentielles à la communication animale et à la structuration des systèmes naturels. L'étudier permet de se plonger dans l'histoire de l'évolution et de la vie : quand les premières espèces vivantes capables de produire des sons sont-elles apparues ? À quoi ressemblaient ces sons « primordiaux » ? Existe-t-il des espèces muettes ? « *Le silence est d'or* », dit-on. Le livre de Jérôme Sueur, nourri par ses recherches et sublimé par son amour de la littérature, de la poésie et de la musique, en apporte une jolie démonstration. ■

Vincent Glavieux

Histoire naturelle du silence, Jérôme Sueur, Actes Sud, 272 p., 22 €

Hommes-femmes, mode d'emploi

GÉNÉTIQUE Ce livre propose d'en finir avec le principe consistant, au nom de la parité de genre, à l'application de la même médecine pour tous. Pourtant, 263 040 études démontrent qu'hommes et femmes ne fonctionnent pas de la même manière. Plus d'Alzheimer et de dépression chez les femmes, de schizophrénie et d'autisme chez les hommes. Autant d'exemples expliqués par la génétique car, oui, dès la conception, les milliards de cellules qui nous constituent ont un sexe. Pour en finir avec le mètre étalon XY. ■ **S. R.-M.**

C'est votre sexe qui fait la différence, Claudine Junien, Nicole Priollaud, Plon, 336 p., 21,90 €

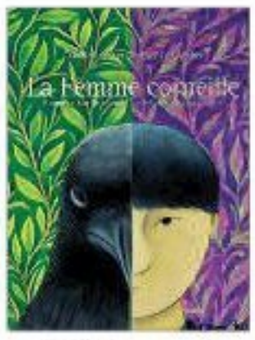
La charcuterie, victime des additifs nitrés

ENQUÊTE En juillet 2022, un avis de l'Anses le confirmait : la présence d'additifs nitrés dans la charcuterie est associée à un risque de cancer colorectal. Pourtant, les rayons des supermarchés regorgent de ces jambons et saucissons. Dans une enquête très documentée, Guillaume Coudray met en lumière les freins empêchant de légiférer sur cette question de santé publique. Informer les consommateurs est une autre façon d'obliger les fabricants à renoncer aux additifs nitrés. C'est l'objectif essentiel de ce livre. ■ **I. do O'G.**

Nitrites dans la charcuterie : le scandale, Guillaume Coudray, HarperCollins France, 240 p., 19 €

L'intelligence des corvidés

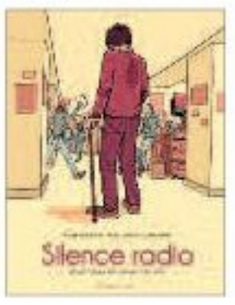
BD Lors de votre prochaine balade dans le Jardin des Plantes de Paris, vous apercevrez peut-être l'une des corneilles qui par milliers cohabitent paisiblement avec les humains. Les auteurs racontent comment la vie de Marie-Lan bascule le jour où elle rencontre un spécialiste des corvidés du Muséum national d'histoire naturelle. Elle se met à photographier les oiseaux. Et peu à peu, elle découvre leur intelligence prodigieuse. Une bande dessinée qui peut changer radicalement votre regard sur les oiseaux qui peuplent nos villes. ■ **H. R.**



La Femme corneille, Camille Royer et Geoffrey Le Guilcher, Futuropolis, 160 p., 22 €

Plus fort que l'AVC

BD « 36 mois pour me relever d'un AVC » : tel est le sous-titre de cet ouvrage. Et telle fut la réalité imposée par les règles de la Sécurité sociale à Bruno Cadène, journaliste à Radio France, terrassé en février 2017 par un accident vasculaire cérébral (AVC), qui l'a laissé sans voix et sans l'usage d'une partie de ses membres. L'enjeu était désormais de reconquérir son emploi, sa passion de l'actualité, sa famille. Cette bande dessinée sensible rend compte du combat heure par heure de cet homme pour revenir sur la scène sociale. Un récit paradoxalement plein de vie. ■ **S. R.**



Silence radio, Xavier Bétaucourt, Bruno Cadène, Olivier Perret, Delcourt, 120 p., 15,95 €

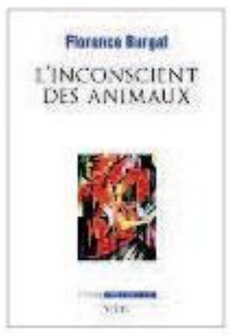
L'Univers selon Hawking

THÉORIE Thomas Hertog fut l'étudiant puis le collaborateur de Stephen Hawking durant les vingt dernières années du physicien décédé en 2018. Il nous livre les ultimes réflexions de son mentor concernant l'Univers, surtout le principe anthropique, cet incroyable « hasard » qui veut que le Big Bang ait accouché d'un Univers favorable à la vie. Un changement infime d'une des constantes de la physique aurait mené à un tout autre destin, comme un Univers vide. Avons-nous eu de la chance ? « *Non* », selon Stephen Hawking et Thomas Hertog qui invitent à un changement complet de point de vue, et à considérer l'Univers passé en fonction du présent, avec des lois physiques ayant évolué avec lui. Et tout comme l'humain est issu d'une sélection au sein des espèces, les lois qui gouvernent la physique aujourd'hui sont le résultat d'une sorte de sélection « darwinienne » menant à la vie. Cet ouvrage dense mais avec des qualités de vulgarisation évidentes mérite d'être lu, ne serait-ce que pour être débattu. ■ **Fabrice Nicot**

L'Origine du temps, la dernière théorie de Stephen Hawking, Thomas Hertog, Odile Jacob, 432 p., 24,90 €

Psychisme des animaux

INTÉRIORITÉ « *Qui sont les animaux ? Si dans notre réflexion, nous délaissons la face sombre de leur existence, notre tentative de les comprendre est vouée à l'échec.* » La philosophe Florence Burgat introduit ainsi son ouvrage consacré au psychisme des animaux. Son analyse est fondée sur une perspective freudienne, selon laquelle les « *animaux supérieurs* » partagent le même appareil psychique que les humains. Traumas et manifestations psychosomatiques témoigneraient ainsi d'un inconscient encore largement insondé. ■ **A. De B.**



L'Inconscient des animaux, Florence Burgat, Seuil, 272 p., 23 €

Limites planétaires

ENQUÊTE Il y a 50 ans paraissait le rapport Meadows, première étude de l'impact des activités humaines sur la planète. Document fondateur et pourtant méconnu. Sa redécouverte a conduit Audrey Boehly à interroger son premier auteur Dennis Meadows, puis à aller chercher les éclairages d'une douzaine d'experts. Une enquête qui a donné naissance à un podcast, un article dans *Sciences et Avenir* en janvier et maintenant un livre. Indispensable car porteur d'espoir malgré des constats accablants. ■ **M. N.**

Dernières Limites. Apprendre à vivre dans un monde fini, Audrey Boehly, Rue de l'échiquier, 238 p., 22 €

EXPOSITIONS

Annecy (74)

Tous sportifs ! La science occupe le terrain
Ce parcours, accessible dès 7 ans, simule un décathlon. Les dix épreuves sont l'occasion d'obtenir des informations en biologie, en physiologie, en physique ou d'en apprendre plus sur le geste sportif.
La Turbine, place Chorus, jusqu'au 3 septembre. Rens. : 04.85.46.74.30.

Brest (29)

Océanolab
Ce nouveau lieu de l'aquarium de Brest est destiné à rendre la science visible pour le public. Pendant un an, les visiteurs peuvent suivre des travaux de chercheurs en résidence dans le domaine de l'écologie marine.
Océanopolis, port de plaisance du Moulin Blanc. Rens. : 02.98.34.40.40.

Genève (Suisse)

Être(s) ensemble
Entre les civilisations humaines et la nature, plantes ou animaux, la communication est une préoccupation permanente, et un thème récurrent des mythes et légendes. Il est évoqué au travers d'objets traditionnels et de récits.
Musée d'ethnographie de Genève, boulevard Carl-Vogt 65, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens. : +41 (0) 22.418.45.50.

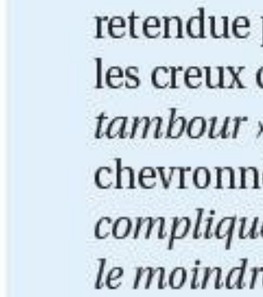
Le Bourget (93)

ma, l'air comme matière
Deux artistes en résidence au musée, Charlotte Charbonnel et Olivier Sévère, présentent leurs œuvres en regard d'objets (certains jamais montrés) provenant des collections du musée. Avec l'air comme thème fédérateur.
Musée de l'air et de l'espace, 3, esplanade de l'Air et de l'Espace, jusqu'au 3 septembre. Rens. : 01.49.92.70.00.

Paris (75)

Saison Prédateurs
Cette saison thématique s'articule autour d'un parcours dans le parc zoologique et d'animations évoquant jaguars, lions et loups. Plus inattendu, il est aussi question de manchots ou d'étoiles de mer. Expositions, lectures et jeux de pistes rythment la saison.
Parc zoologique de Paris, 18, route de la ceinture du lac Daumesnil, jusqu'au 5 novembre. Rens.: 08.11.22.41.22.

Rennes (35)



Rire
Après Paris et Bordeaux, ce parcours accessible au jeune public s'installe en Bretagne. Multipliant les petits ateliers, il fait du rire un objet scientifique. On le trouve chez les humains et chez les animaux, il a des effets sur le corps et possède une dimension sociale.
Espace des Sciences, Les Champs Libres, 10, cours des alliés, jusqu'au 3 septembre. Rens. : 02.23.40.66.00.

Roubaix (59)

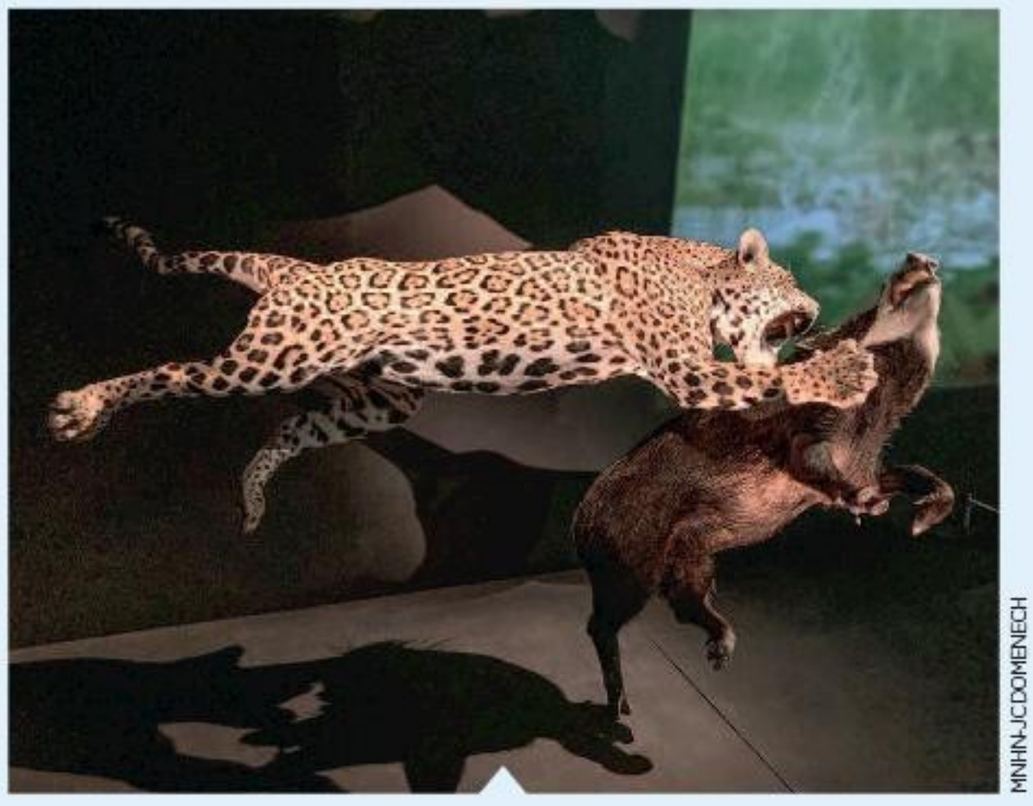
Fake news² : art, fiction, mensonge
D'abord présentée à Paris en 2021, cette exposition est consacrée à la désinformation, mais sous forme d'installations artistiques. De la fabrication à la diffusion, le rôle des réseaux sociaux s'avère prépondérant.
Lire notre article de 2021 : sciav.fr/915fake
La Condition publique, 14, place Faidherbe, jusqu'au 16 juillet. Rens. : 03.28.33.48.33.

Vaulx-en-Velin (69)

De la Terre aux étoiles
En astrophysique, en télécommunications comme en médecine, l'exploration de l'espace a des conséquences très concrètes sur nos sociétés. Cette exposition détaille les moyens techniques et les contraintes physiques que ce domaine implique.
Planétarium, Place de la nation, jusqu'au 2 janvier 2024. Rens. : 04.78.79.50.13.

Paris (75) / Exposition

Félins



MNHN-JCDOMENECH

Taxidermisé, le jaguar Jafar est présenté dans une scène de prédation où il s'apprête à broyer le crâne d'un pécari.

Une petite part d'éternité. C'est ce que le taxidermiste Vincent Cuisset a donné à Jafar le jaguar. L'animal, issu de la réserve naturelle du Mont Grand Matoury, en Guyane, a été fauché en septembre 2022 par un véhicule. Naturalisé, il a retrouvé sa superbe dans une scène de prédation où il broie le crâne d'un pécari. C'est l'une des sculptures spectaculaires qui marquent l'exposition Félins. Elle a demandé des mois de travail. Après avoir sculpté le corps du jaguar dans une position d'attaque, Vincent Cuisset l'a gainé avec la peau, tendue et retendue pour épouser les courbes et les creux de manière à *« éviter un effet tambour »*. Pour ce taxidermiste chevronné, *« les félins, c'est le plus compliqué parce qu'ils ont un poil très ras, le moindre muscle se voit. S'il est trop dessiné, ce n'est pas naturel. Et quand on tend la peau sur le mannequin, on peut se rendre compte qu'on a fait une erreur d'interprétation. »* Une naturalisation se verra toujours, concède l'artiste. *« Mais si je peux émerveiller des gamins, des adultes, c'est une mission un peu gagnée. »*
Lire notre reportage : sciav.fr/915felins ■

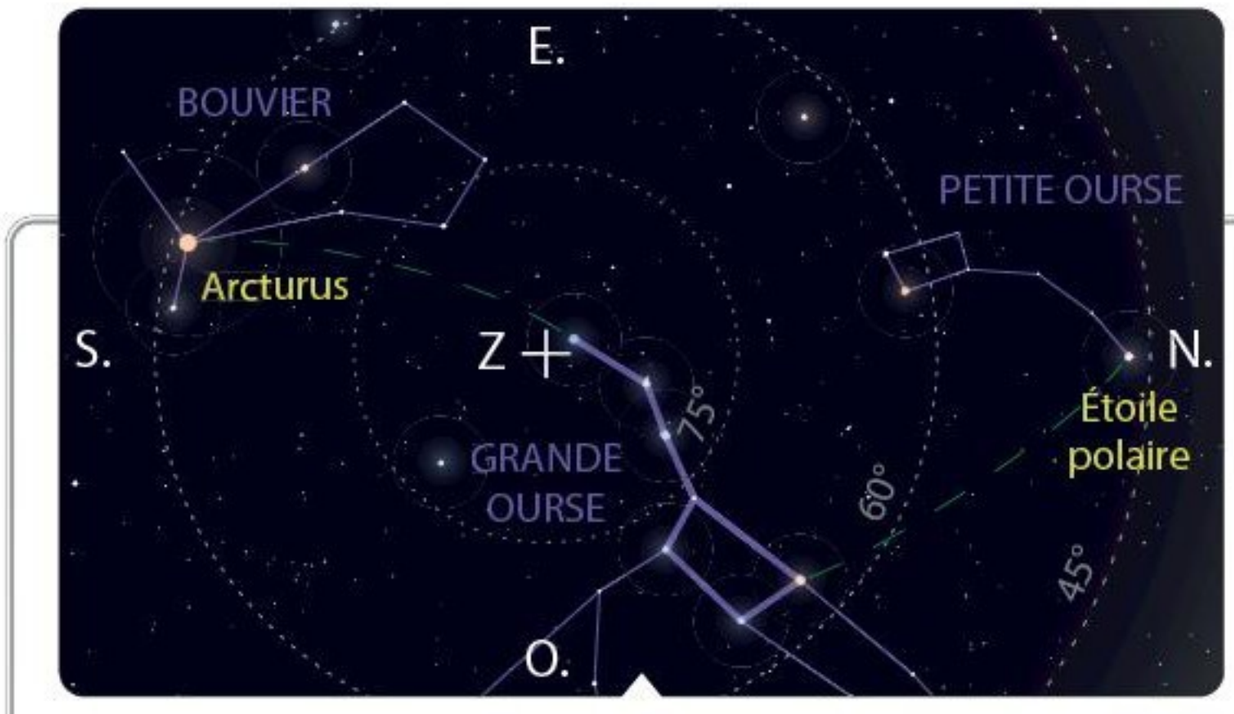
Rachel Mulot

Muséum national d'histoire naturelle, 57, rue Cuvier, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens. : 01.40.79.56.01.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

LE CIEL DE MAI

PAR JOHAN KIEKEN



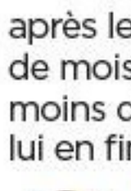
Nous sommes en milieu de mois vers minuit. Les trois cercles en pointillé symbolisent des hauteurs de 45°, 60° et 75° au-dessus de l'horizon. Z est le zénith. Sa hauteur est de 90°.

Un printemps au zénith

LA CONSTELLATION DE LA GRANDE OURSE, avec en son sein les sept étoiles qui forment la « casserole », est une des plus connues et des plus faciles à identifier. Prolongez la ligne passant par les deux étoiles de l'extrémité de la casserole. Vous tomberez alors sur un astre moyennement brillant : l'étoile Polaire. Elle indique la direction du nord. En prolongeant la queue de la casserole selon un arc de cercle, vous atteindrez Arcturus, deuxième étoile la plus brillante du ciel nocturne sous nos latitudes.

Notre conseil Privilégiez la chaise longue pour l'observation, sans quoi vous risquez le torticolis !

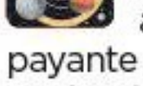
Où sont les planètes ?



MERCURE La petite planète passe en conjonction inférieure dans la nuit du 1er au 2. Elle s'éloigne ensuite de la direction du Soleil jusqu'à atteindre sa distance angulaire maximale (25°) à notre étoile le 29. Mais elle n'est pas visible en métropole, noyée dans les lumières du levant.

VÉNUS L'étoile du Berger domine largement l'horizon ouest en soirée. Il est impossible de ne pas la remarquer. Elle se couche près de 4 h après le Soleil en début de mois et un peu moins de 3 h 30 après lui en fin de mois.

MARS La planète Rouge est visible en soirée et en première moitié de nuit. Son éclat terne la rend peu différentiable des étoiles brillantes à proximité. Mars quitte la constellation des Gémeaux pour entrer dans le Cancer le 17. Sa distance angulaire à Vénus passe de 26° à 11° au cours du mois.

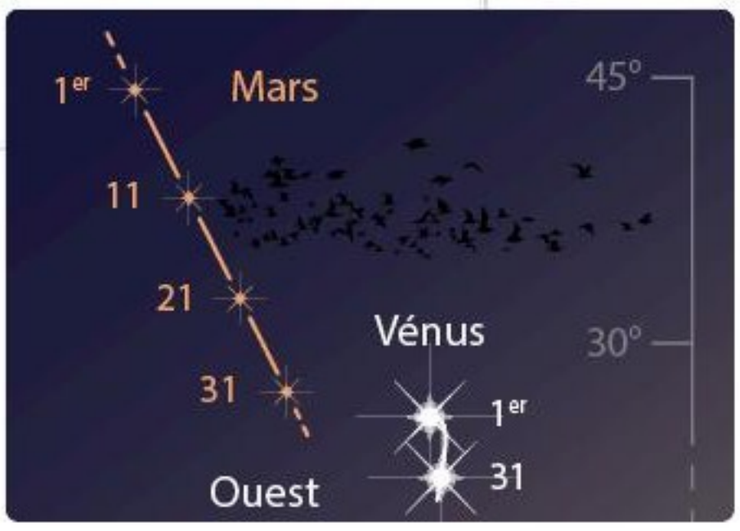


JUPITER Un mois après son passage en conjonction avec le Soleil, la plus massive des planètes fait une timide réapparition dans les lueurs de l'aube en fin de mois.

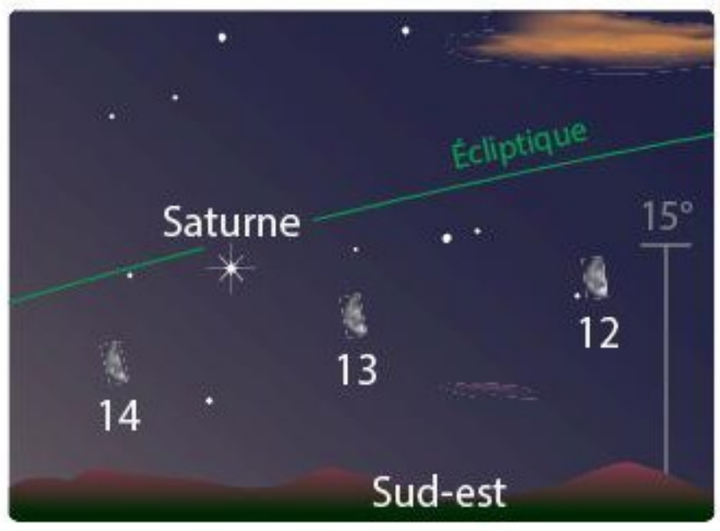
SATURNE On retrouve la planète aux anneaux en fin de nuit et au petit matin, assez bas vers le sud-est, dans la constellation du Verseau.

L'appli du mois

ASTROLAPP est une application payante (1,99 €) pour Android. Grâce à elle, il vous suffit de pointer votre appareil vers le ciel pour identifier étoiles, planètes et constellations. De plus, si vous tapez le nom d'un astre, elle vous guidera vers lui par des flèches de direction.



1 HEURE APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, alors que Mars voit sa hauteur diminuer rapidement de semaine en semaine, Vénus reste, tel un phare, quasi stationnaire dans notre ciel.



PROFITEZ DE LA PROXIMITÉ DU DERNIER QUARTIER DE LUNE avec Saturne à la fin des nuits du 13 et du 14 pour repérer, à coup sûr, l'éclat de la lointaine planète.

LE SOIR DU 23, 1 HEURE APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, admirez le fin croissant de Lune et sa lumière cendrée passer à un peu plus de 3° de la brillante planète Vénus.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de mai

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

La météo du jour, reflet d'un climat qui change

Notre quotidien météorologique se transforme. Les vagues de chaleur se succèdent en été : elles sont désormais longues et torrides. Les épisodes de froid se font rares en hiver : les bourgeons débourrent plus tôt, alors vulnérables aux derniers frimas. Au jour le jour, nous vivons le changement climatique, nous le percevons. « *Ne pas confondre météo et climat* », rétorque-t-on souvent. Cette assertion apparaît comme le dernier vestige d'une définition archaïque du climat, celle de l'état statistique de l'atmosphère déterminé sur une période de 30 ans minimum, telle qu'adoptée en 1935 par l'Organisation météorologique internationale. L'hypothèse qui sous-tend cette définition, la stationnarité des fluctuations atmosphériques sur des échelles de temps décennales et plus, était justifiable à l'époque, mais cette vision statique du climat ne correspond plus à la réalité d'un état atmosphérique qui dérive sous l'influence humaine : +0,5 °C par décennie à l'échelle de la France depuis les années 1980. Présenter la météo du jour dans le contexte d'un climat qui change devenait dès lors une nécessité. C'est le défi engagé par France Télévisions qui modifie tous ses bulletins météo, inchangés depuis plus de 40 ans, début de l'ère satellitale. Une révolution ! Nouveaux narratifs, nouveaux indicateurs, nouvelle ligne éditoriale… Le but est d'être au plus près d'une réalité quotidienne, celle d'une trajectoire climatique qui désormais modifie le temps qu'il fait, mais aussi de transmettre les connaissances des causes et conséquences du changement climatique et des leviers pour devenir « acteur » dans les transformations sociales en cours en lien avec les enjeux climat-biodiversité. Chapeau ! ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

Un algorithme magique

Comment surveiller les passages de paquets dans un réseau et détecter des distributions suspectes ? Il existe une méthode simple et efficace pour mémoriser les éléments qui surviennent fréquemment dans une suite d'éléments. Il s'agit d'un algorithme un peu magique proposé en 2005*. Il a l'avantage de n'utiliser que peu de mémoire. Dans une suite de N éléments, on cherche à repérer un élément présent plus de $N/2$ fois. Il suffit alors de mémoriser deux compteurs pour deux éléments e et f, qu'on met à jour à mesure qu'on voit la suite défiler : si l'élément suivant de la suite est e, on ajoute 1 au compteur de e ; si c'est f, on ajoute 1 au compteur de f ; si c'est un autre élément, g, on regarde lequel de e et f a le plus petit compteur, par exemple f, et on remplace f par g et on ajoute 1 au compteur de g (qui était précédemment le compteur de f). Si la suite contient un élément présent plus de $N/2$ fois, alors cet élément est garanti d'être un des deux éléments mémorisés à la fin ! Par exemple, prenons la suite abbccaaadeaacaa ($N = 15$), où a est présent 8 fois (donc plus de $N/2$ fois). À la fin du processus, on aura mémorisé les éléments c (compteur 6) et a (compteur 9) : l'élément a fait bien partie des deux éléments mémorisés. De même, si on mémorisait 3 éléments au lieu de 2 avec cette méthode, on serait sûr d'avoir tout élément présent plus de $N/3$ fois dans la suite. Cet algorithme baptisé SpaceSaving est aujourd'hui largement utilisé pour les flux massifs de données. ■

* sciav.fr/915algo

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Le cordonnier, l'ultracrépidarianiste et ChatGPT

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

Sutor, ne supra crepidam, littéralement, le cordonnier (*sutor*), pas plus haut que la sandale (*crepidam*). Rapportée par Pline l'ancien dans son *Histoire naturelle*, cette sentence latine signifie que, de ce qui va au-delà de son métier, et que l'on ignore, on ne devrait parler. Un essayiste britannique du XIXe siècle, William Hazlitt, en a dérivé le terme « ultra-crepidarian » pour se moquer d'un rival trop bavard qui se piquait de tout. À la fois substantif et adjectif, le mot désigne et qualifie celui qui va « très au-delà de la sandale », autrement dit qui se prononce sur des sujets sur lesquels il n'a aucune compétence. Avec le temps, on en a dérivé deux néologismes anglais, « ultracrepidarianist », celui qui fait profession de parler de tout sans disposer d'aucune connaissance qui l'y autoriserait, et « ultracrepidarianism », l'évolution de la société qui tend à donner tribune à des personnes dépourvues de tout savoir légitime sur ce dont elles parlent. Le terme n'a été introduit en français, avec un accent et un « e » muet, que très récemment, en 2014. Plus tard, la crise sanitaire du Covid-19 a fait sa fortune, au point qu'il a été élu « mot de l'année 2021 » par les médias belges *Le soir* et la RTBF. La logique médiatique veut que l'on invite des personnes célèbres à s'exprimer à chaud sur des sujets d'actualité où rien ne les autorise à parler. Ainsi demande-t-on à telle chanteuse ou à tel écrivain, voire à tel sportif de donner son avis sur des questions de politique étrangère ou sanitaire, sur lesquelles ils n'ont aucune compétence. Il est aussi des figures connues qui prennent l'habitude d'intervenir sur tout et que l'on invite justement parce qu'elles en parlent avec aplomb et que le grand public leur accorde du crédit car il les reconnaît — sans que cette reconnaissance se fonde sur un mérite attesté. En cela, ces authentiques ultracrépidarianistes sont des précurseurs en chair et en os de… ChatGPT : un logiciel qui parle de tout, sans rien connaître, ni comprendre. ■

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

Mort à 91 ans, le glaciologue français a été l'un des premiers à alerter sur le réchauffement climatique et ses causes anthropiques. En 2009, Claude Lorius racontait ainsi à *Sciences et Avenir* son intuition géniale selon laquelle les glaces anciennes tenaient captif l'air du passé : *« Un soir de 1965, à l'heure de l'apéritif, j'ai plongé dans mon whisky un glaçon qui venait d'un forage d'environ 100 m de profondeur et qui contenait des bulles d'air sous pression. Aussitôt dans mon verre, ces bulles ont éclaté d'une manière qui a frappé mon esprit : n'était-ce pas des bulles d'atmosphère ancienne qui pétillaient ainsi dans mon whisky ? »* **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ANATOMIE

Est-il vrai que le cœur des astronautes se déforme dans l'espace ?

El Watani N.

En apesanteur, le cœur des astronautes change de forme : il devient 10 % plus sphérique lorsque ceux-ci restent au moins 18 mois dans la Station spatiale internationale. C'est ce que révélait une étude de la Nasa en 2014. Cet effet s'explique par la microgravité. Sur Terre, la gravité oblige le cœur à fournir un effort plus important pour fonctionner que dans l'espace, où il peut subir une perte de masse musculaire. Les chercheurs ignorent si cette déformation a un effet sur la santé cardio-vasculaire. Mais ils ont constaté que les astronautes voient leur cœur reprendre sa forme habituelle après leur retour sur Terre. ■

Hugo Jalinière @hugojaliniere

NEUROLOGIE

Quand l'orgasme est-il apparu dans l'histoire de la vie ?

Sédar S.

Comme l'humain, de nombreux animaux (primates, reptiles, poissons) peuvent éprouver des manifestations caractéristiques d'un orgasme : contractions vaginales et anales rythmiques, hyperventilation… *« Mais l'orgasme s'accompagne aussi d'une décharge neuronale, avec sa bouffée de neurohormones telles que les endorphines, la dopamine, l'ocytocine,* explique Thierry Lodé, professeur à l'université de Rennes, *activant ainsi le circuit nerveux de la récompense. Il s'est donc certainement installé avec ou juste après l'invention du système nerveux, au cambrien, il y a 540 millions d'années environ. »* ■

Rachel Mulot @RachelFleaux

SUSANNEKRONHOLM/PLAINPICTURE

Selon la théorie du conflit sensoriel, le mal des transports serait le résultat de l'antagonisme entre les yeux et le vestibule, l'organe de l'équilibre.

PHYSIOLOGIE

Quelle est l'origine du mal des transports ?

Cédric P.

Sueurs froides, maux de tête, nausées, vomissements : autant de symptômes typiques du mal des transports, ou cinétose, qui peuvent transformer les trajets en voiture, avion et bateau en cauchemar. Pour expliquer son origine, trois théories coexistent. La première, la plus connue et la plus étayée depuis les années 1970, est celle du conflit sensoriel : le mal des transports serait une réponse du cerveau au conflit opposant les yeux au vestibule, l'organe de l'équilibre situé dans l'oreille interne. Celui-ci estime que le corps ne bouge pas alors que les yeux perçoivent les ralentissements et les accélérations du moyen de transport, ce qui crée un déséquilibre empêchant le corps de s'adapter aux mouvements.

À la fin des années 1970, une autre explication est apparue : la théorie du poison. Le vestibule serait perturbé au point que le corps interprète l'information comme une intoxication, ce qui peut déclencher des vomissements. Dans les années 2010, enfin, a émergé la théorie de l'instabilité posturale. Selon celle-ci, le mal des transports proviendrait de notre incapacité à ajuster notre posture de manière prolongée pour le réduire.

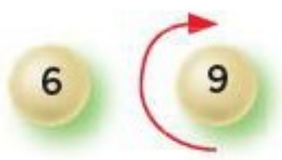
Aucune de ces théories n'explique pourquoi le mal des transports affecte les individus différemment. Toutefois, certains facteurs identifiés augmentent le risque d'en souffrir, comme la fatigue, les mauvaises odeurs, ou encore l'abus d'alcool ou de tabac. ■

Lise Loumé @Lise_Loume

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 914, avril 2023

La somme des boules

Faites pivoter la boule affichant un 6 jusqu'à ce qu'elle affiche un 9. Avec le 2 et le 4 elles totaliseront 15.



Le 421 des signes

4 x 1 x (9 + 6 – 5) x (2 + 8) + 7 x 3 = 421

Quoi, un intrus ?

MORFONDU est le seul mot à ne pas comporter un pronom personnel dans son écriture.

Cryptarithmie

```
  6 3 0 9
+ 2 3 0 4
= 8 6 1 3
```

Logique de noms

Mon nom est NOIR. En effet, TEST retire E et T des trois premiers, ce qui ne laisse que R, A, O, I, N. Ensuite, la place des lettres ne laisse qu'une seule possibilité.

Matoku

19+ 8	12+ 3	7	2	4M 6	4	50x 5	1
4	6	1	28+ 7	8	3	2	5
7	5	6	3	2	1	5M 4	8
5,5M 6	4	40x 2	5	5- 3	8	1	7
5	7	4	8 8	24+ 1	2	15+ 6	3
S 2	1	3	4	5	7	8	6
120x 3	8	5	1	4	168x 6	21+ 7	2
1	4/ 2	8	6	7	5	3	4

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 907
Messages de l'univers lointain

N° 908 7 traitements qui révolutionnent la médecine

N° 909
L'avant Big Bang

N° 910
La science lit dans les pensées

N° 911
Les origines de la vie

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

N° 913 Fusion nucléaire : une révolution pour l'humanité

N° 914
Les clés du contrôle de soi

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 907 ❑ N° 908 ❑ N° 909 ❑ N° 910
❑ N° 911 ❑ N° 912 ❑ N° 913 ❑ N° 914

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

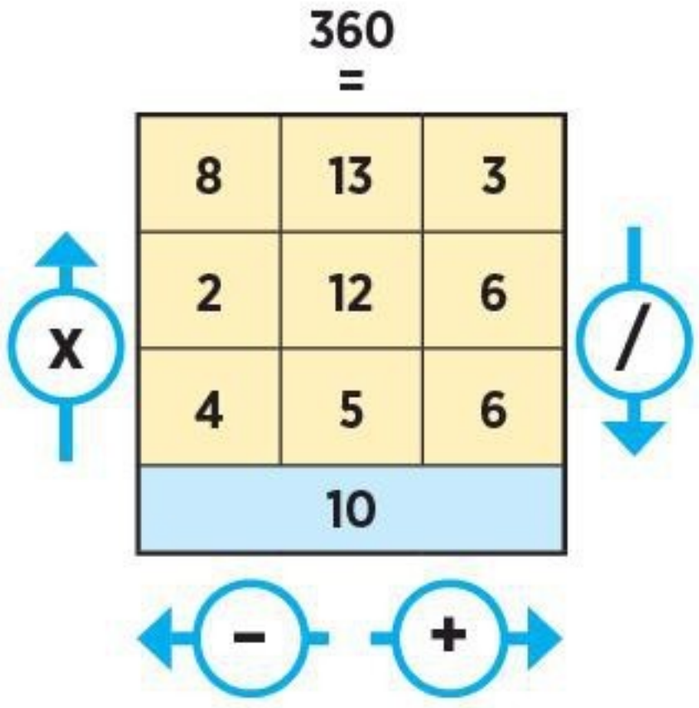
Labyrinthmétique

Obtenez le nombre du haut en partant du nombre dans la case du bas sans passer deux fois par une case et sans forcément les utiliser toutes.

Règles :

- quand on monte d'une case, on multiplie par le nombre du haut,
- quand on descend, on divise par le nombre du bas,
- quand on va à droite, on additionne le nombre de droite,
- quand on va vers la gauche, on soustrait le nombre de gauche.

Le résultat est obtenu sur l'une des trois cases du haut.



Logique nationale

Un pays se cache dans cette suite de mots, lequel ?

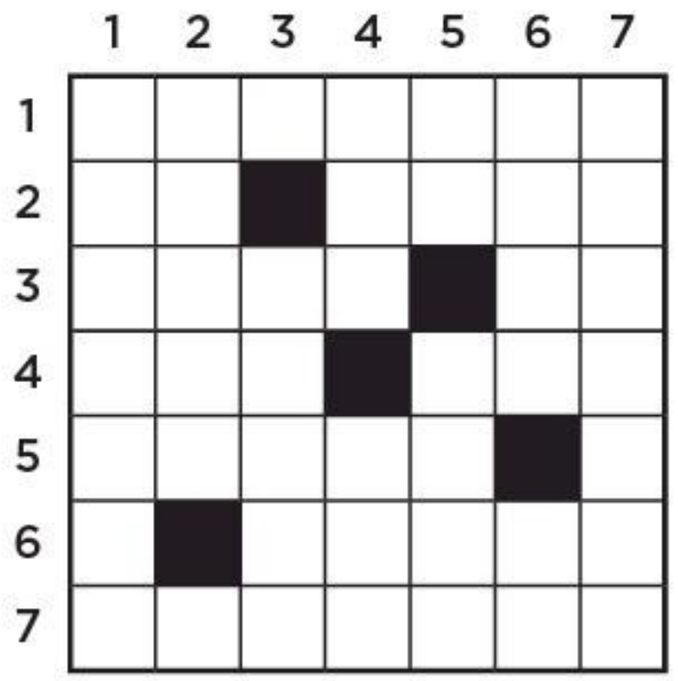
EXIL, SIMILI, MIDI, PAIX, CIVIL, MIG, CLIN, VILLE

Nombres croisés

Cette grille ne se remplit qu'avec des chiffres.

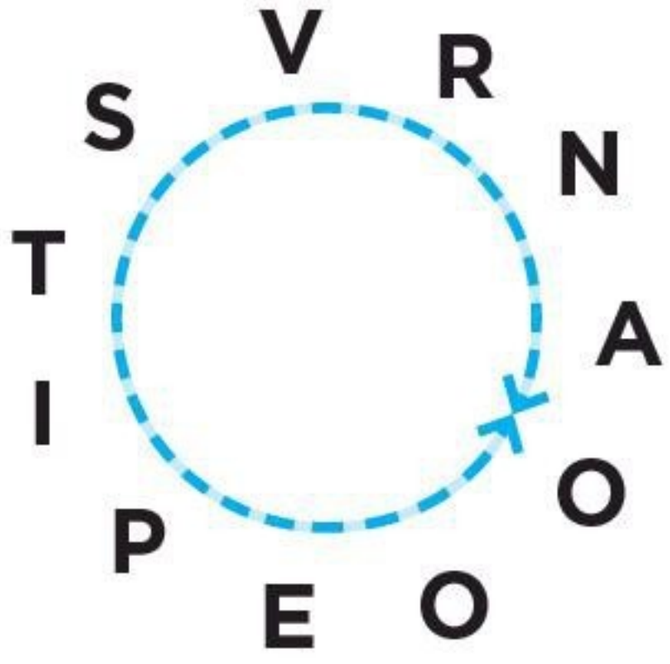
Horizontal : 1. Le premier et les premiers premiers. **2.** Le siècle de la machine - Archinul. **3.** A vu la fin de Henri II - Très bon ou tout juste moyen. **4.** *Phonétique* : renseignement - Pourrait s'écrire 10420. **5.** À un symbole près et mis au carré, cela pourrait faire 2. **6.** Palindrome dont la somme des termes vaut le double du central. **7.** 156238 hexadécimal, en décimal dans la grille.

Vertical : 1. 127 en base 2. **2.** C'est bien avec le rang des lettres. **3.** Nombre dont la deuxième partie est le double de la première. **4.** DIX - Jeu. **5.** A eu aussi sa guerre - Année bissextile qui a commencé un vendredi. **6.** C'est fait pour la poche - C'était la Corse. **7.** Est-ce toujours une brique ?



À cloche-lettres

Quel mot lisez-vous sur ce cercle en sautant régulièrement de lettre en lettre, de 2 en 2, de 3 en 3, ou autre ?



Le chemin des facteurs

Saurez-vous joindre ces 10 nombres d'un trajet fermé où aucun n'a de diviseur commun avec le suivant ?

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

ÉCONOMISEZ JUSQU'À 40% SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET* AVEC LE CODE PROMO SA-VT23
JUSQU'AU 12 MAI 2023 INCLUS
*Tarif early bird inclus

VIVA TECHNOLOGY

LE PLUS GRAND ÉVÈNEMENT STARTUP ET TECH EN EUROPE

L'AVENIR DE LA SANTÉ SE LIT DANS LA DATA.

AVEC UNE PART DE MARCHÉ MULTIPLIÉE PAR 3 D'ICI 2030, DÉCOUVREZ COMMENT LA BIG DATA SE MET AU SERVICE DU MARCHÉ DE LA SANTÉ À VIVATECH.*

*SOURCE : STRAIGHTS RESEARCH - IN TECH WE TRUST = DE CEUX QUI CROIENT EN LA TECH

14-17 JUIN
PARIS PORTE DE VERSAILLES

RÉSERVEZ VOTRE BILLET SUR VIVATECH.COM

IN TECH WE TRUST

CO-ORGANISATEURS

PUBLICIS GROUPE

Groupe Les Echos Le Parisien

africa news. euronews. Bloomberg Media CNN i24 NEWS The Washington Post webedia BFM BUSINESS

L'OR

CAFÉ HAUTE DÉGUSTATION

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

POUR VOTRE SANTÉ, ÉVITEZ DE MANGER TROP GRAS, TROP SUCRÉ, TROP SALÉ. WWW.MANGERBOUGER.FR

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EU ROS.